

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta Strojní

Katedra aplikované mechaniky

Analýza a syntéza zvedacího mechanismu jeřábu

The Analysis and Synthesis of the Crane Lifting Mechanism

Student:

Adam Růžička

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.

Ostrava 2019

Zadání bakalářské práce

Student:

Adam Růžička

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

3901R003 Aplikovaná mechanika

Téma:

Analýza a syntéza zvedacího mechanismu jeřábu
The Analysis and Synthesis of the Crane Lifting Mechanism

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Popis problematiky kinematiky jeřábů
2. Analýza procesu zvedání vybraného typu jeřábu
3. Syntéza mechanismu vybraného typu jeřábu jako vodícího mechanismu
4. Závěrečné shrnutí

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Brát V., Jáč V., Rosenberg J. : Kinematika. SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha 1987
- [2] Brát V. : Maticové metody v analýze a syntéze prostorových vázaných mechanických systémů. Academia, Praha 1981
- [3] Vinogradov O. : Fundamentals of Kinematics and Dynamics of Machines and Mechanisms. CRC Press, Boca Raton, London, 2000, ISBN 0-8493-0257-9


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019


Ing. Martin Fusek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20. května 2019


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou*) práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́домі́, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská*) práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. května 2019



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Adam Růžicka

Adresa trvalého pobytu autora práce: Ivana Sekaniny 1796/7, 708 00, Ostrava-Poruba

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

RŮŽIČKA, A. *Analýza a syntéza zvedacího mechanismu jeřábu: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky, 2019, s. Vedoucí práce: Podešva, J.

První z hlavních částí této práce se zabývá analýzou rozevírání a vztyčování dvoudílného sloupu samostavztyčného sloupového jeřábu ze vodorovné polohy s díly složenými na sobě do svislé polohy se do přímá rozevřenými díly a na něm závislého procesu zvedání výložníku jeřábu ze polohy na horním dílu sloupu do polohy kolmé na sloup systémem lan. Výstupem této části jsou průběhy úhlu sklonu dílů sloupu a výložníku jeřábu vůči rámu. Ve druhé hlavní části bude provedena rozměrová syntéza čtyřkloubového vodícího mechanismu přístavního jeřábu se kloubovým výložníkem, tak aby bod na konci převislého ramene tětvice opisoval pro co největší rozsah pohybu mechanismu trajektorii co nejbližší vodorovné přímce. Bude přitom použito celkem dvou metod optimalizace rozměrů mechanismu – největší citlivosti a největšího spádu cíl. funkce optimalizace a závěrem jsou porovnány trajektorie toho bodu u mechanismu se původními rozměry vstupujícími do optimalizace a se optimalizovanými rozměry získanými danou metodou a mechanismy s optimalizovanými rozměry navzájem.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

RŮŽIČKA, A. *The Analysis and Synthesis of the Crane Lifting Mechanism: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Applied Mechanics, 2019, s. Thesis head: Podešva, J.

First main part of thesis is focused on analysis of unfolding and erecting a two part self-erecting tower crane's tower from horizontal position with parts of the tower lying folded up on each other to vertical position with parts unfolded into straight angle, and dependent process of lifting crane's boom from position on crane's tower's top part to horizontal position perpendicular to the tower, via system of cables. The main analysis' outputs is determining the function of tower parts' and boom's rake angles in relation to horizontal cradle. In second part there is going to be performed dimensional synthesis of four bar linkage mechanism of level-luffing harbour crane, so that point, lying at the very end of the coupler's overhanging arm, would copy the trajectory as close to horizontal line for as large portion of mechanism's motion as possible. The synthesis of the mechanism is going to be solved by using two methods of dimensions' optimization – method of biggest sensitivity and method of biggest gradient of optimization's target function and in the end there is going to be compared trajectory of mentioned point for mechanism with original dimensions a for mechanisms with optimized dimensions and for mechanisms with optimized dimensions mutually.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto odstavcem bych chtěl vřele poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Podešvovi Ph.D. za jeho velmi cenné odborné poznámky, ochotu při konzultacích k bakalářské práci, poskytnutí podpůrných podkladů pro řešení praktické části, a za pomoc a velkou trpělivost se mnou při vypracovávání zejména textové části práce.

Obsah

1	Úvod	9
2	Stručný úvod k jeřábům	10
2.1	Definice pojmu jeřáb, zařazení jeřábů mezi stroji a základní zařízení jeřábů	10
2.2	Základní způsoby rozdělení jeřábů	13
3	Analýza procesu zvedání samostavitelného sloupového jeřábu	22
3.1	Stručná charakteristika samostavitelných sloupových jeřábů	22
3.2	Podrobný popis procesu zdvihání samostavitelného sloupového jeřábu	23
3.3	Analýza mechanismu rozevírání a vztyčování věže a zdvihu výložníku	29
3.3.1	Strukturální analýza mechanismu z hlediska jeho stupně pohyblivosti	30
3.3.2	Uvedení k řešení kinematiky zvedání potřebných rozměrů mechanismu	31
3.3.3	Kinematika rozvírání a vztyčování sloupu a zdvihu výložníku jeřábu	41
3.3.4	Analýza procesu(submechanismu) rozvírání a vztyčování věže jeřábu	42
3.3.5	Analýza kinematiky procesu(submechanismu) zdvihu výložníku jeřábu	51
3.3.6	Grafy funkcí významných veličin polohy mechanismu zdvihu jeřábu	72
3.3.7	Závislost natažení lan zdvihu výložníku na úhlu sklonu Dílu 1	74
4	Syntéza vodícího mechanismu přístavního portálového jeřábu	76
4.1	Analýza čtyřkloubového přímovodu ABCDEF přístavního jeřábu	76
4.1.1	Strukturální analýza čtyřkloubového přímovodu jeřábu ABCDEF	77
4.1.2	Kinematická analýza 4-kloubového mechanismu jeřábu ABCD(EF)	78
4.2	Rozměrová syntéza čtyřkloubového přímovodu ABCD(EF) jeřábu	79

4.2.1	Obecný teoretický úvod, podstata, principy a matematické pozadí týkající se optimalizačních metod řešení rozměrové syntézy mechanismů obecně.....	79
4.2.2	Stanovení vektoru rozměrových parametrů 4-kloubového přímovodu ABCD(EF) přístavního jeřábu proměnných v rámci jeho rozměrové optimalizace.	82
4.2.3	Definice použité cílové funkce při optimalizaci přímovodu ABCD(EF) .	83
4.2.4	Počáteční odhad vektoru rozměrů 4-kloubového přímovodu ABCD(EF)	84
4.2.5	Metoda největší citlivosti cíl. funkce při změně 1 jejího parametru.....	84
4.2.6	Metoda největšího spádu cíl. funkce při změně vektoru jejích parametrů	91
5	Závěr.....	111
6	Seznam použitých zdrojů	112

1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá mechanikou jeřábů, konkrétně pak úlohami strukturální a zejména kinematické analýzy a rozměrové syntézy (syntézy optimalizací hodnot rozměrových parametrů) dvou typově a účelem odlišných různých zvedacích mechanismů jeřábu.

První hlavní část této práce se zabývá strukturální a kinematickou analýzou procesu (složeného mechanismu) vzájemného rozevírání a vztyčování dílů sloupu samostavztyčného sloupového jeřábu z vodorovné přepravní polohy s díly složenými na sobě na podstavném kříži či podvozku jeřábu, jenž představuje vůči mechanismu jeřábu nehybný rám, do svislé pracovní polohy s díly sloupu rozevřenými v přímý úhel poháněného hydraulickým pístovým mechanismem, volný konec jehož pístu při svém vysouvání z hydraulického válce, odtlačuje s pístem kloubem spojené vzpěry spodního a horního dílu sloupu, a následně přes ně rozevírání díly sloupu, přičemž dochází ke natažení táhla zdvihu sloupu vůči rámu, k němuž a hornímu dílu sloupu je kloubově připojeno, a následně pak vztyčování obou dílů sloupu, a na něm závislého zvedání výložníku jeřábu z přepravní polohy na horním dílu sloupu do pracovní polohy kolmé na sloup jeřábu systémem v rámci zdvihu sloupu postupně natahovaných a prověšovaných tří lan natačejících vzpěru protivýložníku jeřábu vůči hornímu dílu sloupu a přes k této vzpěře kloubově uchycené lano (vzpěry) protivýložníku natáčí s tímto lanem a lanem (závěsem) výložníku stejným kloubem spojenou vzpěru výložníku jeřábu vůči hornímu dílu věže, kde při vlastním procesu zdvihu výložníku z horního dílu věže se výložník, vzpěra výložníku a závěs výložníku jeřábu chovají jako jedno těleso, a tedy společně se vzpěrou protivýložníku dojde i k natažení a zdvihu výložníku jeřábu z horního dílu. Hlavním výstupem této části jsou průběhy funkcí úhlu sklonu dílů sloupu a výložníku jeřábu vůči rámu a úhlu rozevření horního dílu a výložníku jeřábu a průběhu stavu natažení lan sloužících k natažení vzpěry protivýložníku jeřábu v závislosti na úhlu sklonu spodního dílu sloupu vůči rámu.

Ve druhé hlavní části bude pak provedena rozměrová syntéza čtyřkloubového vodícího mechanismu zdvihacího zařízení přístavního portálového jeřábu se členěným kloubovým úhlově stavitelným výložníkem, které jsou navrhovány tak, aby bod na konci převislého ramene těhlice mechanismu opisoval pro co největší rozsah úhlu natočení hnacího ramene mechanismu trajektorii co nejbližší ke vodorovné přímce. Bude přitom použito dvou nejjednodušších metod optimalizace rozměrů mechanismu – největší citlivosti a největšího spádu cílové funkce úlohy optimalizace a závěrem jsou porovnány trajektorie tohoto bodu u mechanismu se původními rozměry vstupujícími do optimalizace a se optimalizovanými rozměry získanými danou metodou a mechanismy s optimalizovanými rozměry navzájem.

2 Stručný úvod k jeřábům

2.1 Definice pojmu jeřáb, zařazení jeřábů mezi stroji a základní zařízení jeřábů

Jeřáby jsou strojní zařízení sloužící ke zvedání a přemísťování těžkých předmětů (břemen), jak ve směru svislém, tak ve směru vodorovném směru na předem stanovené místo a jejich udržení ve zdviženém stavu ve relativním klidu vzhledem ke konstrukci jeřábu a ve vyžadované výšce, a to v rámci prostoru (na vzdálenosti), který je vymezen pohyby jeřábu, jimiž jsou pojezd ve vodorovném směru, zvedání a spouštění ve směru svislém, a otoč (otáčení) okolo svislé osy. [3], [4], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]

Jeřáby jsou dopravní stroje spadající do kategorie zdvihacích zařízení. Do této kategorie patří kromě jeřábů i jednoduchá zdvihadla a výtahy. Jednoduchá zdvihadla jsou skupinou zdvihacích zařízení, jež se vyznačují jednoduchou konstrukcí a malými rozměry a v důsledku toho rovněž i nízkou hmotností vzhledem ke velikosti zvedací síly, kterou vyvozují, obzvláště pak v porovnání právě s výtahy a jeřáby. Umístění zdvihadel se v rámci jejich pracovního cyklu nemění, i přestože tyto zdvihadla jsou díky své konstrukci, malým rozměrům a hmotností obvykle snadno přemístitelná. Mezi jednoduchá zdvihadla jsou řazeny zvedáky, kladkostroje a navíjedla, přičemž právě kladkostroje s navíjedly jsou důležitými součástmi zvedacího ústrojí jeřábů. Navíjedla, jež jsou někdy rovněž nazývána vrátky, jsou tvořeny ručně, elektricky, hydraulicky nebo pneumaticky poháněnými jedním nebo i více navíjecími bubny, jejichž rotačním pohybem se vyvozuje tažná síla v laně, jež bubny opásává, přičemž pak tato tažná síla slouží k překonání tíhy a zdvihání břemene.



[27]

Obr. 1: Kladkostroj stavitelného jeřábu se závěsným hákem sloužícím k uchycení břemene



Obr. 2: Elektrický lanový naviják (jednobubnové navíjecí) 220 V se zavěšenou kladnicí [28]

Jeřáb je strojem sloužícím ke přetržité plynulé dopravě přesunovaných břemen (materiálu) z místa naložení do místa vykládání břemene. Plynulou přetržitou dopravou je taková, v rámci níž se materiál po určité předem vymezené dráze rovnoměrně přesouvá v pravidelných intervalech ve vždy shodných a relativně malých množstvích, přičemž pak ty části dopravního zařízení, které vykonávají přepravu břemen (materiálu) z nakládacího do vykládacího místa musí v rámci tohoto způsobu dopravy konat z důvodu opakovaného přesunu materiálu po menších částech rovněž i pohyb zpět ze vykládacího na nakládací místo, tj. pohyb musí být vratný. V případě, že tento vratný pohyb vykonává stále jedna a ta stejná konkrétní část tohoto dopravního zařízení, což je u jeřábů splněno, jedná se pak o cyklickou plynulou přetržitou dopravu přemísťovaných břemen (materiálu). Jeřáb je tedy zdvihacím zařízením (dopravním strojem) určeným pro cyklický plynulý přetržitý provoz.

Jeřábem zvedané a přemísťované břemeno bývá obvykle zavěšeno na jeřábovém háku, jenž je většinou součástí kladnice obsahující volnou kladku lanového kladkostroje či pak v případě, že se jedná o kladkostroj násobný, i více volných kladek, přičemž tento kladkostroj je poháněn tažnou silou působící v ose ocelového lana, jež bývá u jeřábu v technické praxi nejčastěji vyvozena rotací elektricky poháněného navíjecího bubnu. V některých případech pak bývá jeřábem přesouván materiál (břemeno) místo jeřábového háku uchopen za pomoci drapáku, chapadla, jeřábových svěrných kleští nebo může být břemeno uchyceno prostřednictvím elektromagnetu, vázacích řetězů či lan apod. Zejména jeřáby používané v hutnictví mohou mít i jiný, specializovaný, uchopovací prostředek.



Obr. 3:Kladnice s jeřábovým hákem [29]



Obr. 4:Mostový jeřáb s drapákem [30]

Pevné kladky kladkostrojů a navíjecí bubny lan kladkostrojů pak bývají nejčastěji součástí tzv. visuté pojezdové kočky – malého „vozíčku“, jenž pojíždí po kolejnici nebo přírubě umístěné na horní straně nebo uvnitř nejčastěji buď mostu, nebo výložníku jeřábu, v závislosti na tom, o jaký typ konstrukce jeřábu jde, případně může být kočka podvěšena pod nimi, tedy že kolejnice či příruba, po které tato kočka pojíždí, je umístěna na spodní straně mostu nebo výložníku jeřábu. Pojezdová kočka může mít v sobě zabudováno buď jedno, či 2 zdvihač, kdy v druhém případě je obvykle jedno zdvihač tzv. hlavní s větší nosností a druhé je vedlejší s obvykle výrazně menší nosností, jež se používá pro úsporu energie nutné k pohonu silnějšího zdvihač v případě zdvihu břemen malé celkové tíhy.



Obr. 5: Pojezdová kočka Select 30G [31]

2.2 Základní způsoby rozdělení jeřábů

Jeřáby bývají rozdělovány dle celkového tvaru nosné konstrukce jeřábu či tvaru části nosné konstrukce jeřábu, jež je pro daný druh jeřábu charakteristická, druhu pohonu (zdvihacích, pojezdových, .. zařízení) jeřábu, druhů pohybů, jež jeřáb (hlavní část jeho nosné konstrukce) v rámci pracovního cyklu koná (možnosti pojezdu nosné konstrukce jeřábu), druhu práce, k jejímuž vykonávání jeřáb slouží, místu (prostředí), v němž jeřáb tuto práci vykonává, podle konstrukce (typu) prostředku, jenž slouží k uchopení jeřábem zdvihaného břemene, podle velikosti a náročnosti provozu, v němž jeřáb pracuje, atd.

Konkrétně se pak jeřáby, nebo spíše ještě obecněji zdvihadla dělí podle výše uvedených kritérií do těchto skupin:

a) Zdvihadla jednoduchá: zvedáky, kladkostroje, navíjeďla

b) Podle celkového tvaru nosné konstrukce nebo její charakteristické části:

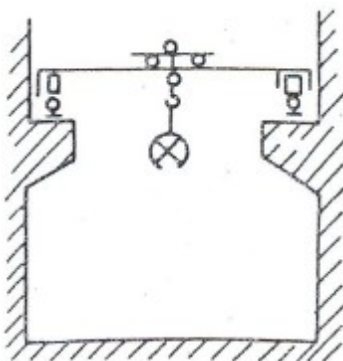
- konzolové jeřáby
- lanové jeřáby
- mostové jeřáby
- plovoucí jeřáby
- portálové a poloportálové jeřáby
- silniční a kolejové jeřáby
- sloupové a věžové jeřáby

Případně je možný i následující způsob dělení jeřábů podle jejich konstrukce:

1. Jeřáby mostového typu: prostředek sloužící k uchopení břemene je zavěšen na mostě prostřednictvím pojezdové kočky, kladkostroje, nebo výložníkové zástavby, jež se pohybují po délce jeřábového mostu, který je představován jedním nebo dvojicí příčných nosníků, na nichž je umístěna kolejnice nebo příruba jako pojezdová dráha pro kočku nebo pojezdový kladkostroj, případně může být nosník mostu vytvarovaný, tak aby sám tvořil pojezdovou dráhu

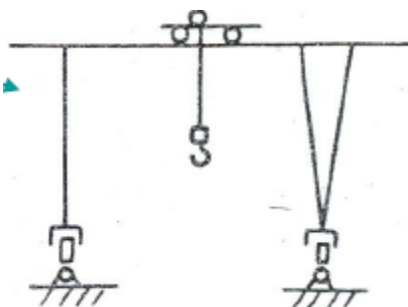
Tyto jeřáby se dále dělí na tři typy:

- mostový jeřáb (most se opírá svými podvozky přímo pod jeřábovým mostem o vodorovnou a na most kolmou pojezdovou dráhu jeřábu)



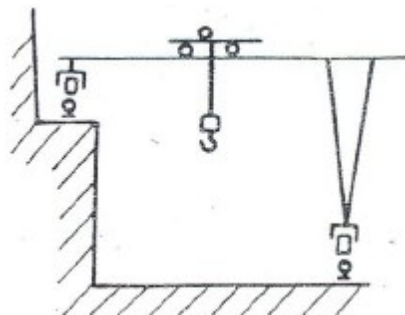
Obr 6.: Schéma mostového jeřábu [7]

- portálový mostový jeřáb (podvozky opírající se o jeřábovou dráhu se nacházejí na spodních koncích svislých podpěr (noh) mostu jeřábu)



Obr 7.: Schéma portálového mostového jeřábu [7]

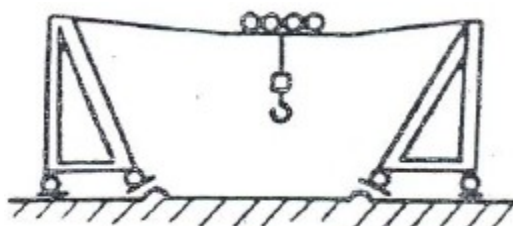
- poloportálový mostový jeřáb (most jeřábu se opírá o jeřábovou dráhu z jedné strany podvozkem umístěným na dolním konci jediné svislé podpěry mostu a z druhé strany podvozkem nacházejícím se přímo pod jeřábovým mostem)



Obr 8.: Schéma poloportálového mostového jeřábu [7]

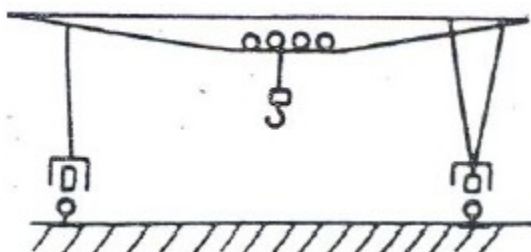
2. Jeřáby s nosnými lany: prostředek sloužící k uchopení břemene je zavěšený na visuté kočce pojíždějící po nosném laně upevněném a napínaném na krajních podpěrách nosného lana jako dráhy kočky, po níž se tato kočka pohybuje pomocí tažného lana

- lanový jeřáb (nosná lana tohoto typu jeřábu jsou uchyceny a napínány v horní části krajních podpěr jeřábové dráhy)



Obr 9.: Schéma lanového jeřábu [7]

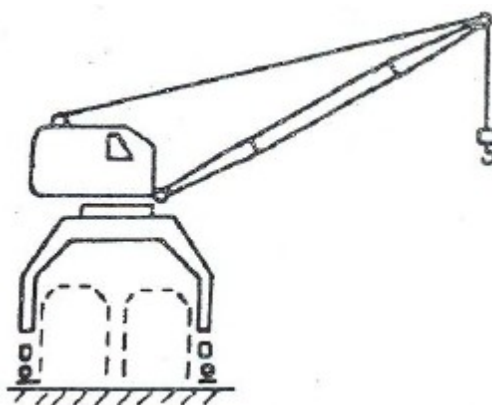
- mostový lanový jeřáb (nosná lana jeřábu jsou uchyceny na koncích mostu opírajícím se o jeřábovou dráhu podvozkem na spodním konci podpěr)



Obr 10.: Schéma mostového lanového jeřábu [7]

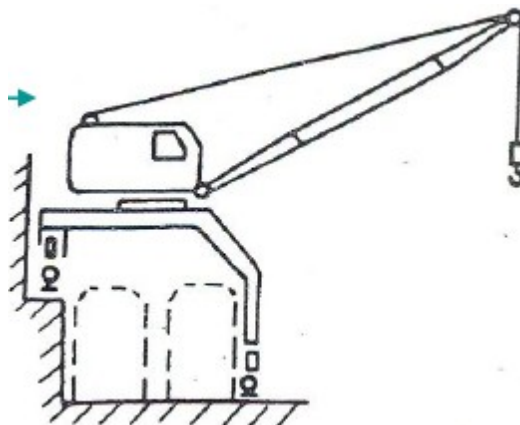
3. Jeřáby výložníkového typu: prostředek uchopující břemeno je zavěšený obvykle prostřednictvím kladkostroje s navíjecím bubnem lana kladkostroje buď přímo na volném konci výložníku, nebo v případě jeřábů se stále vodorovným výložníkem na pojezdové kočce pojíždějící po kolejnici nebo přírubě umístěné na výložníku jeřábu

- portálové otočné jeřáby (horní část jeřábu skládající se z kabiny pro operátora jeřábu se ke kabině připevněným nejčastěji stavitelným otočným a v obecném případě šikmým výložníkem, který je v rámci pracovního cyklu možno sklápět nebo vztyčovat, závaží k vyvážení klopného momentu tíhy výložníku jeřábu, navíjedlo lana sloužícího k zdvihu břemene nejčastěji s elektrickým pohonem a otáčecí mechanismus jeřábu se nachází na otočné ploše točnice nacházejícím se na horní ploše portálu opírajícím se podvozkem na spodních konci obou noh portálu jeřábu vodorovné pojezdové dráhy jeřábu na zemském povrchu)



Obr 11.: Schéma portálového otočného jeřábu [7]

- poloportálový otočný jeřáb (totéž co portálový jen horní plocha portálu, na níž je umístěna otočná plocha točnice jeřábu, se na jednom konci opírá pojezdové dráhy jeřáby podvozkem umístěným přímo pod horní plochou portálu, jak pod portálovým tak pod poloportálovým otočným jeřábem pak mohou díky značné rozteči krajních noh portálu jeřábu (jednotlivých podvozků poloportálového jeřábu) projíždět železniční vagóny nebo nákladní silniční vozidla)



Obr 12.: Schéma poloportálového otočného jeřábu [7]

- mobilní jeřáby (nosná konstrukce jeřábu je umístěna buď na nosné plošině těžkého nákladního automobilu, kolovém podvozku (podvozek z velkých kol) či na pásovém podvozku, díky čemuž je jeřáb schopen jízdy buď s jeřábem zdvihaným a přemísťovaným břemenem, nebo i bez něj, a to po jízdni dráze, která není konstrukcí jeřábu pevně dána, a jeřáb je pak tudíž velmi mobilní, kde jeřáb s podvozkem nákladního automobilu nebo kolovým podvozkem je dokonce schopen jízdy po silničních komunikacích, kdy tyto autojeřáby mají obvykle výložník teleskopicky vysouvateľný a stabilita nosné konstrukce je zvyšována prostřednictvím hydraulicky ovládaných výsuvných podpěr)



Obr. 13: Liebherr LTM 11200 9.1 - Gigantický autojeřáb [32]



Obr. 14: Dvojice jeřábů na pásovém podvozku [33]

- věžové jeřáby (otočný jeřáb s nejčastěji vodorovným výložníkem z příhradové konstrukce umístěným v horní části svislé příhradové věže nebo plnostěnného sloupu jeřábu, kdy s výjimkou **samostavitelných (samovztyčných)** jeřábů, jež jsou smontovány, a následně jsou pak i přepravovány jako celek s nejčastěji plnostěnným sloupem a závažím sloužícím k vyvážení klopného momentu od tíhy výložníku, uložených na otočném ložisku nacházejícím se na podvozku, kdy se pak jedná o jeřáb s tzv. spodní otočí, jenž je i se závažím na pracovním místě obvykle usazen na patkách či kolejích a prostřednictvím hydraulického systému je vztyčen sloup jeřábu do svislé polohy za současného zvedání výložníku z polohy výložníku ležícího na sloupu až do polohy vodorovné a kolmé na sloup prostřednictvím na tomto hydraulickém systému závislém systému tažných lan a nakonec obvykle i rozevření vnitřního a vnějšího dílu výložníku pomocí dalšího již nezávislého hydraulického systému, přičemž oba dva systémy jsou pak nejčastěji ovládány elektronicky dálkově operátorem z povrchu země, se věže **univerzálních věžových jeřábů** sestavují jako pevné dohromady z jednotlivých dílců a sekcí svařovaných příhradových konstrukcí, přičemž všechny tyto díly bývají obvykle všechny zcela shodné, aby byla co nejvíc zabráněno nesprávného složení věže jeřábu a byla usnadněna přeprava těchto dílců, jenž jsou k sobě navzájem montovány jako stavebnice a následně jsou jejich spoje pojištěny prostřednictvím čepů a celá věž pak i pomocí lan, přičemž pak věž jeřábu bývá prostřednictvím centrálního dílu věže, kolem něhož se příhradová konstrukce věže staví, ukotvena pevně na patkách, křížích, kolejovém či stacionárním podvozku nebo pak přímo v betonovém základě za pomoci daného jeřábu stavěné budovy, přičemž v posledním případě ukotvení věže se nepoužívá závaží sloužící ke stabilizaci nosné konstrukce jeřábu proti klopnému momentu tíhy výložníku, který bývá jinak ukotveno k centrálnímu dílu, a na horním konci vrchního dílu věže se pak nachází otoč jeřábu, jde tedy o jeřáb s horní otočí, na níž je pak následně nasazena špice jeřábu s kabinou pro operátora jeřábu s hlavním výložníkem a protivýložníkem nacházejících se nad kabinou, a pro další stabilizaci je uloženo na protivýložník další závaží, u vysokých staveb se pak používají i **tzv. šplhací jeřáby** rostoucí společně se stavbou, tak že vrchní díl věže s otočí a výložníkem je uložena na tzv. stoupací rám, jenž je hydraulickým systémem zvedán, tak aby pod něj bylo možno vložit další dílec věže, přičemž věžové jeřáby mohou být buď bez pojezdu operující v kruhové ploše nebo s pojezdem po kolejnici operující po oválu



Obr. 15: Věžový jeřáb JVS [34]

- železniční (kolejové) jeřáby (nosná konstrukce jeřábu je umístěna na plošině železničního vagónu nebo mnohem častěji se jedná o naprosto specializované železniční (kolejové) vozidlo, jež je způsobilé pro jízdu a pracovní činnost na železničních tratích, případně se pohybuje po specializovaných kolejích)



Obr. 16: Železniční jeřáb zdvihající vykolejený nákladní železniční vagón [35]

- plovoucí jeřáby (nosná konstrukce jeřábu je umístěna na speciálním pontonu plovoucím na vodní hladině, jenž se po vodě přesouvá buď jako vlek za lodí (obvykle remorkérem) nebo má vlastní pohon)



Obr. 17: Plovoucí jeřáb [36]

- palubní jeřáby (nosná konstrukce jeřábu je otáčivě uložena na palubě lodi a slouží pro nakládku a vykládku břemen z této lodě, někdy jsou palubní jeřáby spolu se železničními (kolejovými) a plovoucími (pontonovými) jeřáby řazeny mezi mobilní jeřáby)



Obr. 18: Loď se dvěma palubními jeřáby [37]

- stožárové jeřáby (

3 Analýza procesu zvedání samostavitelného sloupového jeřábu

3.1 Stručná charakteristika samostavitelných sloupových jeřábů

V rámci této kapitoly bakalářské práce bude provedena analýza procesu zvedání samostavitelného sloupového jeřábu, přičemž tento typ jeřábů bývá občas nazýván rovněž i jako jeřáby samovztyčné nebo rychlomontovatelné a nebo bývají tyto jeřáby řazeny ke věžovým jeřábům a nazývají se pak samostavitelné (samovztyčné) věžové jeřáby.

Tento typ jeřábů se oproti ostatním typům věžových jeřábů, jež jsou sestavovány jako rozebíratelná stavebnice z jednotlivých dílců a sekcí ze svařovaných příhradových konstrukcí montáží dílů až přímo na místě stavby, jsou samostavitelné jeřáby smontovány do jednoho celku již přímo v průmyslovém podniku vyrábějícím a následně prodávajícím či pronajímajícím tento typ jeřábů a na pracovní místo jeřábu jsou tyto spolu s centrálním závažím jeřábu, které slouží ke stabilizaci jeřábu proti klopnému momentu vyvolanému tíhou i excentricitou polohy těžiště v pracovní poloze jeřábu, jež je právě požadovanou koncovou polohou jednotlivých dílů jeřábu při analyzovaném procesu zvedání jeřábu, vodorovného výložníku vůči jak poloze těžiště kříže nebo podvozku, na němž jeřáb stojí, tak ose v pracovní poloze svislého sloupu jeřábu, přepraveny již v stavu se smontovanými prostřednictvím čepů kloubově (rotačně) vzájemně spojenými příslušnými díly jeřábu.

Samostavitelné věžové jeřáby mají pak právě kvůli odlišného způsobu sestavování (montáže) a vzájemného pořadí montáže a přepravy jeřábu na pracovní místo rovněž i odlišný princip otáčení výložníku jeřábu okolo svislé osy (osy věže jeřábu), než ostatní věžové jeřáby. U většiny věžových jeřábů je svislá věž jeřábů stavěna jako pevná okolo centrálního dílu věže, který je uložený na kříži, v betonovém základě jeřábem stavěné budovy či na kolejovém nebo stacionárním podvozku a na horním dílci věže je umístěna tzv. horní otoč se kabinou jeřábníka a na ní připevněným výložníkem a protivýložníkem jeřábu. Samostavitelné jeřáby mají pak tzv. dolní otoč na podvozku jeřábu a společně se výložníkem a protivýložníkem se otáčí celá nosná konstrukce jeřábu i centrální závaží.

Samostavitelné jeřáby mají jako vztyčný svislý prvek obvykle plnostěnný sloup skládající se z navzájem kloubově spojených nejčastěji dvou dílů, spodního a horního. Na horním konci horního dílu je k tomuto dílu opět kloubově připojen vnitřní díl výložníku jeřábu, jenž bývá nejčastěji ze svařované příhradové konstrukce, k němuž nejčastěji bývá pomocí ke vnitřnímu dílu výložníku kloubově připojeného speciálního spojovacího dílu výložníku jeřábu opět kloubově připojen rovněž příhradový vnější díl výložníku jeřábu.

3.2 Podrobný popis procesu zdvihání samostavitelného sloupového jeřábu

Samotný proces zvedání samovztyčného sloupového (věžového) jeřábu se pak konkrétně skládá ze dvou základních procesů zvedání nebo jinak řečeno ze zvedání dvou základních částí jeřábu a to konkrétně sloupu (věže) jeřábu a výložníku jeřábu z přepravní polohy jeřábu do polohy pracovní.

Přepravní poloha jeřábu, je pak definována oběma díly sloupu (věže) i výložníku jeřábu ve vodorovné, nebo alespoň přibližně vodorovné, poloze se spodním dílem sloupu ležícím na vodorovném podvozku jeřábu, na spodním dílu následně ležícím horním dílem sloupu (věže) jeřábu, na tomto dílu pak ležícím vnitřním dílu výložníku a něm nakonec ležícím vnějším dílu výložníku. V této poloze jsou tedy jak velikosti úhlů sklonu těchto dílů jeřábu vzhledem ke vodorovnému vůči složenému mechanismu sloužícímu k účelu vzájemného rozevírání dílů sloupu jeřábu a jejich vztyčování do svislé polohy a na něm závislého zvedání vnitřního i s ním přes dvě rovinné kloubové vazby na spojovacím dílu výložníku jeřábu spojeného vnějšího dílu výložníku ze polohy, ve které výložník leží na horním dílu sloupu, do vodorovné, a tudíž rovněž na podélnou osu sloupu kolmé polohy, nehybnému myšleného rámu, za nějž je pak v důsledku na předchozí stránce uvedeného faktu, že samostavitelné jeřáby mají tzv. dolní otoč, při níž se spolu se výložníkem jeřábu otáčí okolo svislé osy (podélné osy věže jeřábu) vůči kříži nebo kolejovému podvozku, na nichž jeřáb na pracovním místě stojí, (zemskému povrchu) jako celek i zbytek konstrukce jeřábu i se sloupem jeřábu a veškerými vzpěrami, táhly, rameny a lany, které slouží ke rozevírání a vztyčování dílů sloupu a zvedání výložníku jeřábu, jako složený rovinný mechanismus, jehož všechny členy se pohybují buď v rovině kolmé na zemský povrch (vodorovný podvozek jeřábu, jež je určena podélnými osami (jednotlivých dílů) sloupu a výložníku jeřábu, nebo v rovinách, jež jsou s touto rovinou rovnoběžné, až na jednu na výjimku, kterou je rovinná posuvná pevná vazba mezi hydraulickým válcem vztyčování a vzájemného rozevírání spodního a horního dílu sloupu jeřábu a pístem tohoto válce, jež je právě onou hnací kinematickou dvojicí celého tohoto složeného rovinného mechanismu, rovinnými pevnými kloubovými vazbami vzájemně spojujícími jednotlivé příslušné členy mechanismu, považován právě kříž nebo podvozek jeřábu, na nichž se patní ložisko, jež umožňuje zmíněné natáčení tohoto rovinného mechanismu okolo svislé osy, nachází, a jejichž pohyb nebo právě uvedené otáčení je pak unášivým pohybem tohoto složeného mechanismu, tak velikosti úhlů vzájemného rozevření spodního a horního dílu sloupu jeřábu, rozevření horního dílu sloupu a vnitřního dílu výložníku a rozevření vnějšího dílu a vnitřního dílu výložníku jeřábu jsou tedy všechny nulové, nebo alespoň téměř nulové.

V pracovní poloze samostavitelných sloupových jeřábů jsou pak spodní a horní díl sloupu plně rozevřeny do přímého úhlu (tedy do úhlu 180°) a vztyčeny do svislé polohy, a tedy do pravého úhlu sklonu vzhledem ke vodorovnému vůči složenému rovinnému mechanismu, se téměř výlučně jen kloubovými pevnými vazbami pohyblivě spojujícími jednotlivé příslušné členy tohoto mechanismu, ke vzájemnému rozevírání dílů sloupu a jejich vztyčování do svislé polohy a zvedání výložníku z polohy na horním dílu sloupu do polohy vodorovné a kolmé na podélnou osu sloupu jeřábu, myšleného rámu, za nějž je pak považován kříž nebo kolejový podvozek, na kterých je pak jeřáb (tento mechanismus) postavený, či jako celek koná společně s podvozkem unášivý posuvný pohyb, a na nichž se rovněž nachází patní ložisko představující dolní otoč (tohoto mechanismu) jeřábu, díky níž se mechanismus jako celek může unášivě otáčet okolo svislé osy kolmé na zemský povrch, a výložník jeřábu je pak zvednutý do vodorovné polohy, a tudíž úhel jeho sklonu vůči vodorovnému rámu je roven nule a úhel vzájemného rozevření horního dílu sloupu a vnitřního dílu výložníku jeřábu je tak roven pravému úhlu. V závislosti na požadované maximální velikosti poloměru pomyslné vnější hranice oblasti, která má formu kružnice ležící se v libovolné vodorovné rovině rovnoběžné se zemským povrchem, a tudíž pak i se středem této kružnice ležícím kdekoli na svislé podélné ose sloupu (věže) jeřábu, již musí jeřáb na svém pracovním místě v rámci své pracovní činnosti obsluhovat, pak může buď vnější díl výložníku jeřábu zůstat složený na vnitřním dílu výložníku a velikost úhlu rozevření dílů výložníku je tudíž pak rovna nule, nebo v případě, že je třeba obsluhovat oblast o větší maximální požadované velikosti poloměru její kruhové vnější hranice je tudíž pak možnost prostřednictvím systému dvojice pístových mechanismů, které jsou pak rozloženy navzájem symetricky podle roviny symetrie spojovacího dílu vnitřního a vnějšího dílu výložníku jeřábu, která je kolmá na navzájem rovnoběžné roviny, v níž se pak pohybují veškeré členy zmíněného složeného rovinného mechanismus hydraulickým válcem prvního z pístových mechanismů připojeným kloubovou vazbou k vnitřnímu dílu výložníku a válcem druhého připojeného rovněž kloubovou vazbou ke vnějšímu dílu výložníku a konce obou v těchto válcích posuvně pohyblivě uložených pístů těchto obou mechanismů jsou pak ve dvojnásobné kloubové vazbě, jež se nachází v jednom bodě (na jednom čepu kolmém na rovinu mechanismu jeřábu) ležícím ve zmíněné rovině symetrie a skládajícím se ze vazby pístu vnitřního dílu ke spojovacímu dílu výložníku a vazby spojovacího dílu ke pístu vnějšího dílu, a dvou podle uvedené roviny navzájem souměrně položených kloubových vazeb s jednou připojující spojovací díl výložníku ke vnitřnímu a druhým připojujícím vnitřní díl výložníku ke spojovacímu dílu, rozložit výložník jeřábu do rozevřené polohy se přímým úhlem rozevření vnitřního a vnějšího dílu výložníku jeřábu.

Prvním ze analyzovaných procesů zvedání samovztyčného jeřábu je tedy zmíněné vzájemné rozevírání a vztyčování dolního a horního dílu sloupu (věže) jeřábu z přepravní polohy jeřábu, kdy spodní díl sloupu leží na podvozku jeřábu a horní díl leží v nulovém úhlu rozevření na dolním díle věže, do pracovní polohy, kdy jsou oba díly rozevřeny do přímého úhlu a vztyčeny do svislé polohy.

Hnacím prvkem (kinematickou dvojicí) zmíněného procesu (složeného rovinného mechanismu) rozevírání a vztyčování sloupu jeřábu je hydraulický systém představovaný pístovým mechanismem tvořeným hydraulickým válcem rozevírání a vztyčování sloupu (věže) jeřábu a v tomto válci posuvně pohyblivě uloženým pístemválce (posuvná pevná rovinná vazba mezi těmito dvěma členy mechanismu), jež je u samostavitelných jeřábu nejčastěji ovládaný elektronicky kabelem nebo dálkovým ovládáním operátorem jeřábu, jenž se pak nachází na zemském povrchu. Hydraulický válec pak bývá obvykle připojen kloubovou pevnou rovinnou vazbou ke spodnímu dílu sloupu a píst válce je pak pomocí dvojnásobné kloubové pevné rovinné vazby v jednom bodě (jednoho čepu se podélnou osou kolmou na všechny navzájem rovnoběžné roviny, v nichž se pohybují veškeré členy zmíněného složeného rovinného mechanismu) skládající se ze kloubové vazby spojující ten konec pístu hydraulického válce, jenž je z válce vysunut ven a nenachází se uvnitř něj, s jedním z konců krátké vzpěry spodního dílu sloupu jeřábu, jejíž druhý konec je pak připojený kloubovou pevnou rovinnou vazbou právě ke spodnímu dílu sloupu jeřábu, a kloubové vazby spojující tuto vzpěru s jedním koncem vzpěry horního dílu sloupu, již lze také brát jako vazbu spojující vysunutý konec pístu válce právě se vzpěrou horního dílu sloupu, jejíž druhý konec je opět kloubovou pevnou vazbou připojen tentokrát k hornímu dílu sloupu, připojen právě k těmto dvěma vzpěrám. Hnacím pohybem, jenž hydraulický systém tohoto složeného rovinného mechanismu skládající se ze hydraulického válce a ve něm posuvně pohyblivě uloženého pístu tohoto válce (posuvná pevná rovinná kinematická dvojice mezi válcem a jeho pístem) vykonává, je vysouvání pístu z hydraulického válce. Jelikož je hydraulický válec připojený k spodnímu dílu sloupu jeřábu připojen kloubovou vazbou pevnou, což pak znamená, že se poloha této vazby na dolním díle věže ani válci nemění, a také i kloubové pevné vazby ve dvojnásobné kloubové vazbě mezi vysunutým koncem pístu a vzpěrou dolního sloupu a také mezi touto vzpěrou a vzpěrou horního dílu sloupu jeřábu, případně pak koncem pístu a vzpěrou horního dílu svou polohu na pístu a vzpěrách nemění, tak při vysouvání pístu z válce dochází ke vzdalování dvojnásobného kloubu od pevného kloubu připojujícího válec k spodnímu dílu sloupu jeřábu, a tudíž pak i ke odtlačování vzpěr spodního a horního dílu od kloubu válce na spodním dílu sloupu.

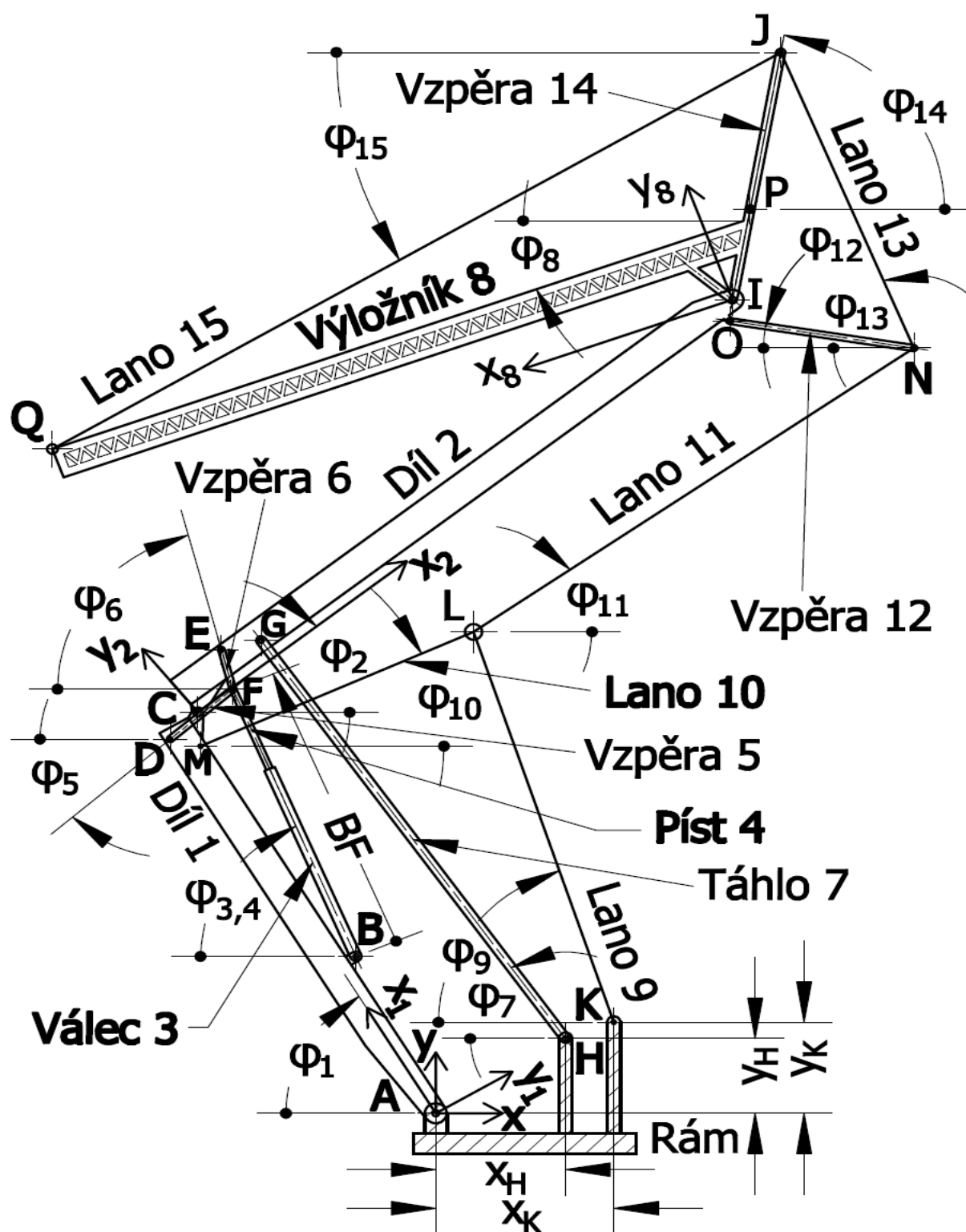
V rámci odtlačování dvojnásobné kloubové pevné rovinné vazby, která se nachází v jednom bodě a jež se skládá se ze vazby připojující konec pístu hydraulického válce rozevírání a vztyčování spodního a horního dílu sloupu (věže) jeřábu uloženého posuvně pohyblivě v tomto válci, jež je pak vysunutý ven z tohoto válce a nenachází se tak uvnitř něj, ke vzpěře spodního dílu sloupu jeřábu a vazby připojující tuto vzpěru, případně pak vysunutý konec pístu hydraulického válce ke vzpěře horního dílu sloupu jeřábu, přičemž pak tento dvojnásobný kloub pak je ve skutečnosti realizován jako jediný čep s podélnou osou čepu kolmou na navzájem rovnoběžné roviny, v kterých se pohybují všechny členy složeného rovinného mechanismu rozevírání a vztyčování spodního a horního dílu sloupu jeřábu, na kterém jsou navzájem otáčivě pohyblivě uloženy ty konce vzpěr dílů sloupů, které se nenachází na čepech, jež spojují tyto vzpěry s příslušnými díly sloupu jeřábu a jež mají své podélné osy rovnoběžné s osou čepu spojující členy mechanismu setkávající se ve dvojnásobném kloubu, a vysunutý konec pístu, od kloubové pevné vazby připojující válec ke spodnímu dílu sloupu jeřábu, kde toto odtlačování je důsledek vysouvání pístu ze hydraulického válce, při kterém dochází ke zvětšování vzdálenosti dvojnásobného kloubu od kloubu válce na spodním dílu sloupu, dochází pak i ke zvětšování vzdálenosti tohoto dvojnásobného kloubu od kloubu spodního dílu sloupu připojujícího díl ke vodorovnému vůči tomuto složenému rovinnému mechanismu nehybnému rámu, za nějž je považován kříž nebo kolejový podvozek jeřábu, na nichž pak tento složený mechanismus na svém pracovním místě stojí, případně se pak jako celek společně s ním unášivě posouvá nebo se na patním ložisku, jež je umístěno také na kříži či podvozku, představujícím dolní otoč tohoto složeného rovinného mechanismu pak tento mechanismus jako celek unášivě otáčí okolo svislé osy kolmé na zemský povrch, přičemž pak tato kloubová pevná vazba je z hlediska průmětu své polohy do podélné osy spodního dílu sloupu jeřábu, na které tento kloub dokonce leží, se pak nachází na opačné straně od průmětu kloubu připojující hydraulický válec k spodnímu dílu sloupu jeřábu do podélné osy dílu, než se na podélné ose dílu nachází průmět polohy kloubu připojujícího vzpěru spodního dílu k tomuto dílu.

Poněvadž pak mezi hydraulickým válcem a uvnitř tohoto válce posuvně pohyblivě uloženým pístem je posuvná pevná rovinná vazba, která pak dovoluje pouze vzájemné posouvání hydraulického válce a jeho pístu ve směru jejich podélných os, pak tedy spojnice kloubu válce na spodním dílu a dvojnásobného kloubu musí být přímkou, jež se v tomto případě shoduje s podélnými osami válce a pístu tohoto válce, a vzpěra spodního dílu je pak čárové těleso, jehož oba koncové klouby se nachází na jeho podélné ose, tak klouby připojující válec a vzpěru ke spodnímu dílu a dvojnásobný kloub tvoří trojúhelník.

Na základě z kosinovy věty pro trojúhelník $\triangle BDF$, přičemž bod B představuje kloubovou pevnou vazbu připojující hydraulický válec rozevírání a vztyčování spodního a horního dílu sloupu jeřábu ke spodnímu dílu, bod D pevný kloub připojující jeden konec vzpěry spodního dílu sloupu k tomuto dílu a bod F pak dvojnásobný kloub připojující k sobě vysunutý konec pístu uložený posuvně pohyblivě uvnitř hydraulického válce, druhý z konců vzpěry spodního dílu a jeden z konců vzpěry horního dílu sloupu, a tedy strana BD trojúhelníku odpovídá úsečce na přímce spojující klouby válce a vzpěry spodního dílu na spodním díle, jež je v obecném případě skloněna vzhledem ke podélné ose spodního dílu sloupu o úhel konstantní velikosti, BF je úsečka na přímce spojující kloub válce na spodním díle sloupu jeřábu a dvojnásobného kloubu na vysunutém konci pístu navzájem totožné s podélnými osami válce a jeho pístu a DF je pak úsečka na podélné ose vzpěře spodního dílu spojující oba její pevné vazby, přičemž tato kosinova věta je pak vyjádřena pro velikost úhlu trojúhelníku přilehlého ke vrcholu D trojúhelníku označeného pak jako $\angle BDF$, jehož velikost se pouze o konstantní velikost úhlu sklonu přímky spojující body B a D ode podélné osy spodního dílu sloupu odlišuje od velikosti úhlu sklonu podélné osy vzpěry spodního dílu, a tudíž pak i vzpěry samotné, vzhledem ke podélné ose spodního dílu sloupu jeřábu, se rovnicí kosinové věty pro tento úhel pak vyjádřený ve tvaru: $BF^2 = BD^2 + DF^2 - 2BD \cdot DF \cdot \cos \angle BDF$, odvozeného vztahu k výpočtu velikosti kosinu úhlu $\angle BDF$: $\cos \angle BDF = \frac{BD^2 + DF^2 - BF^2}{2 \cdot BD \cdot DF}$, uvážení faktu, že jedinou nezávisle proměnnou veličinou je v rámci výše uvedeného vztahu délka úsečky BF, s kterou se ovšem nepočítá v součinu prováděného v rámci jmenovatele zlomku na pravé straně uvedené rovnice, jehož hodnota pak zůstává vždy konstantní a hodnota zlomku je závislá jen na vyčíslené hodnotě výrazu v rámci čitatele zlomku, faktu, že v rámci procesu vysouvání pístu z hydraulického válce ze válce se délka úsečky BF zvětšuje, v důsledku čehož pak tudíž kvůli znaménka odčítání nacházejícím se před druhou mocninou délky úsečky dochází tedy pak ke snižování hodnoty čitatele i celého zlomku na pravé straně rovnice a nakonec i uvážení faktu, že funkce kosinus je v rámci uzavřeného intervalu velikosti úhlu, jehož kosinus je stanovován: $\langle 0; \pi \rangle$, v rámci kterého se pak musí nacházet právě rovněž velikost úhlu $\angle BDF$, jelikož se dvojnásobný kloub musí nacházet vždy v mezeře vytvořené mezi spodním a horním dílem sloupu jeřábu a kromě toho zejména platí, že postupně nejnižší a největší vysunutí pístu z hydraulického válce a tedy i nejmenší a největší velikost délky úsečky BF odpovídají přepravní a pracovní poloze jeřábu, je funkce stále klesající, a tudíž pak pro menší hodnoty úhlu nabývá vyšších funkčních hodnot, tak pak při postupném vysouvání pístu z válce dochází rovněž i ke zvětšování velikosti úhlu sklonu (podélné osy) vzpěry spodního dílu sloupu jeřábu vzhledem ke podélné ose spodního dílu sloupu.

Na předchozích třech stránkách uvedená fakta o složeném rovinném mechanismu rozevírání a vztyčování spodního a horního dílu sloupu jeřábu do svislé polohy platí rovněž i ve případě, že namísto situace, kdy bývá ke spodnímu dílu sloupu je kloubovou pevnou rovinnou vazbou připojený hydraulický válec rozevírání a vztyčování dílů sloupu a za pomoci dvojnásobné kloubové pevné vazby jsou k sobě připojeny vzpěry spodního a horního dílu sloupu jeřábu a vysunutý ze konců ve tomto hydraulického válce posuvně pohyblivě uložený (s tímto válcem pomocí posuvné pevné rovinné kinematické vazby (dvojice) připojeného) pístu tohoto válce, kdy v tomto případě pak při vysouvání pístu z hydraulického válce, při kterém se zvětšuje vzdálenost těchto dvou kloubů, dochází v důsledku ke odtlačování dvojnásobné kloubu od pevného kloubu válce na spodním díle, kloubu připojovacího tento spodní sloupu k vodorovnému vzhledem k tomuto zmíněnému mechanismu nehybného rámu, za nějž je pak považován kříž nebo kolejový podvozek, na němž jeřáb na svém pracovním místě stojí, a obecně ke odtlačování tohoto dvojnásobného kloubu od spodního dílu sloupu jeřábu, se kterým je pak rovněž dále spojeno zvětšování velikosti úhlu sklonu (podélné osy) vzpěry spodního dílu sloupu jeřábu vůči podélné ose spodního dílu, je naopak kloubovou pevnou rovinnou vazbou ke spodnímu dílu sloupu připojený vysunutý konec pístu z hydraulického válce a dvojnásobný kloub pak vzájemně spojuje ten konec hydraulického válce, z něhož se nevysunuje píst tohoto válce, a jeden ze dvou konců vzpěr spodního a horního dílu sloupu, kde pak v podstatě dochází naopak ke odtlačování spodního dílu sloupu jeřábu od tohoto dvojnásobného kloubu, kdy však z geometricko - kinematického hlediska nedochází k absolutně žádné změně poněvadž i při tomto způsobu uložení pístového mechanismu válce a jeho pístu na složeném rovinném mechanismu rozevírání a vztyčování sloupu dochází ke zvětšování vzdálenosti kloubu umístěného pevně na spodním díle sloupu, který se tudíž pak vzhledem ke spodnímu dílu sloupu nepohybuje od dvojnásobného kloubu, který se pak nachází na opačných koncích tuhého tělesa, respektive kinematické dvojice tuhých těles navzájem spojených posuvnou pevnou rovinnou kinematickou vazbou, než na nichž jsou tyto členy(kinematické dvojice) pohyblivě otáčivě vzhledem ke spodnímu dílu sloupu uloženy na spodním díle sloupu a tudíž pak i tento dvojnásobný kloub musí konat vzhledem ke spodnímu dílu sloupu jeřábu relativní rovinný pohyb, přičemž v tomto případě se pak jedná o obecný rovinný pohyb, přičemž zvětšování vzdálenosti zmíněných dvou kloubů pístového mechanismu znamená, že se zvětšuje i nezávisle proměnná velikost délky úsečky spojující tyto klouby ležící na přímce totožné s navzájem totožnými osami hydraulického válce a jeho pístu a tudíž i na velikosti délky této úsečky závisle proměnné velikosti úhlu sklonu (podélné osy) vzpěry spodního dílu sloupu jeřábu vzhledem ke podélné ose spodního dílu sloupu jeřábu.

3.3 Analýza mechanismu rozevírání a vztyčování věže a zdvihu výložníku



Obr. 19: Kinematické schéma mechanismu rozevírání zvedání dílů sloupu a výložníku jeřábu

3.3.1 Strukturální analýza mechanismu z hlediska jeho stupně pohyblivosti

Strukturální analýzou mechanismu (pohyblivé soustavy tuhých těles) je myšlena analýza jeho struktury z hlediska počtu tuhých těles tvořících (rovinnou) pohyblivou soustavu těles – rovinný mechanismus) včetně vůči mechanismu zdvihu jeřábu nehybného myšleného rámu

$$i = 3 \cdot (n - 1) - 2 \cdot (k + p + v) - j \quad (3.1)$$

n – počet členů mechanismu (tuhých těles tvořících (rovinnou) pohyblivou soustavu těles – rovinný mechanismus) včetně vůči mechanismu zdvihu jeřábu nehybného myšleného rámu

k – počet kloubových pevných rovinných kinematických vazeb (kinematických dvojic) odebírajících soustavě těles dva z celkového možného počtu stupňů volnosti soustavy

p – počet posuvných pevných rovinných vazeb odebírajících dva stupně volnosti

v – počet valivých rovinných kinematických vazeb (kinematických dvojic) bez prokluzu v bodě dotyku spojených těles soustavy odebírajících dva stupně volnosti ze možného počtu

j – počet rovinných vazeb odebírajících vždy po jednom ze celkového možného počtu stupňů volnosti (posuvná kloubová rovinná vazba, obecný rovinná vazba s prokluzem v bodě dotyku)

Z Obr. 19 vyplývá,

$$i = 3 \cdot (16 - 1) - 2 \cdot (21 + 1 + 0) - 0 = 1 \quad (3.2)$$

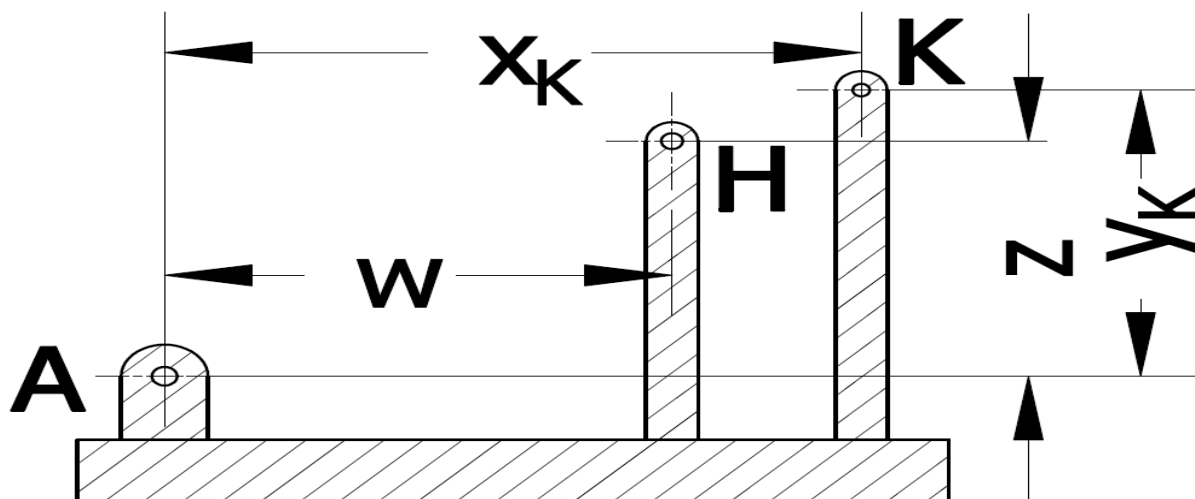
$$i = 3 \cdot (14 - 1) - 2 \cdot (18 + 1 + 0) - 0 = 1 \quad (3.3)$$

$$i = 3 \cdot (14 - 1) - 2 \cdot (18 + 1 + 0) - 0 = 1 \quad (3.4)$$

$$i = 3 \cdot (12 - 1) - 2 \cdot (15 + 1 + 0) - 0 = 1 \quad (3.5)$$

$$i = 3 \cdot (8 - 1) - 2 \cdot (9 + 1 + 0) - 0 = 1 \quad (3.6)$$

3.3.2 Uvedení k řešení kinematiky zvedání potřebných rozměrů mechanismu



Obr.20: Schéma pro kinematiku potřebných rozměrů vůči mechanismu nehybnému rámu

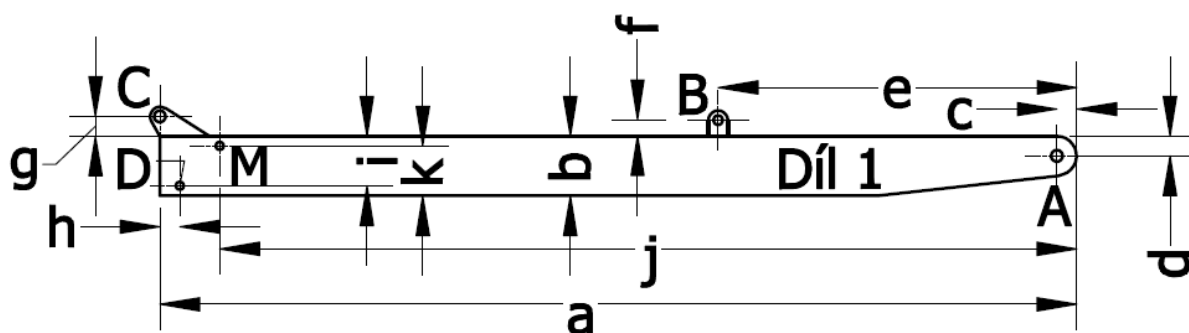
Délkové souřadnice polohy kloubových pevných rovinných vazeb (kinematických dvojic) označených po řadě A, H, K, připojujících po řadě spodní díl sloupu jeřábu – Díl 1, táhlo zdvihání (horního dílu) sloupu (věže) jeřábu (Dílu 2) – Táhlo 7, a spodní lano procesu zdvihání výložníku jeřábu (Výložníku 8) z Dílu 2 (natáčení vzpěry (ramene) protivýložníku – vzpěry 12 (ramene 12) vzhledem ke Dílu 2) ke vzhledem ke celému složenému rovinnému mechanismu (vázanému mechanickému systému) vzájemného rozevírání a vztyčování dílů sloupu ze vodorovné do svislé polohy a zvedání výložníku jeřábu z Dílu 2 do polohy kolmé na sloup nehybnému myšlenému rámu jsou vyjádřeny ve kartézském globálním souřadném systému celého mechanismu se počátkem souřadnic umístěným uprostřed kloubové vazby A s kladnou poloosou vodorovné osy souřadného systému x směřující doprava a kladnou poloosou svislé osy y směřující nahoru.

$$w = 1,165 \text{ m} \quad \text{Poloha kloubu H uchycení táhla 7 ke rámu, vodorovná souřadnice} \quad (3.7)$$

$$z = 0,739 \text{ m} \quad \text{Poloha kloubu H uchycení táhla zdvihu věže 7 k rámu, svislá souřadnice} \quad (3.8)$$

$$x_K = 1,6 \text{ m} \quad \text{Poloha kloubu K uchycení spodního lana zdvihání výložníku jeřábu natáčením vzpěry protivýložníku jeřábu (Vzpěry 12) – Lana 9 a při 3 fázi procesu zvedání výložníku metalana 9+11 zdvihání výložníku natáčením vzpěry protivýložníku jeřábu. které je pak tvořeno i Lanem 9, ke vůči celému mechanismu rozevírání a vztyčování dílů sloupu a zvedání výložníku jeřábu do polohy kolmé na sloup nehybnému rámu, vodorovná souřadnice} \quad (3.9)$$

$$y_K = 0,9 \text{ m} \quad \text{Poloha kloubu K uchycení spodního lana zvedání výložníku jeřábu ze horního dílu sloupu do polohy kolmé na sloup jeřábu ke nehybnému rámu, svislá souřadnice} \quad (3.10)$$



Obr.21: Schéma uvádějící k řešení kinematiky potřebné rozměry spodního dílu sloupu jeřábu

Zadané délkové souřadnice polohy kloubových pevných rovinných vazeb (kinematických dvojic) připojujících spodní díl sloupu jeřábu – Díl 1 k rámu a další díly mechanismu k Dílu 1 jsou s výjimkou rozměrů b , g , h , k vyjádřeny v rámci zadaného kartézského souřadného systému s počátkem souřadnic umístěným na pravém konci horní podélné hrany dílu, a to pak v případě, že by tento roh Dílu 1 byl v nezaobleném stavu (v případě, že by se v tomto rohu dílu nalézala ostrá hrana kolmá na navzájem rovnoběžné roviny, v nichž se pohybují všechny členy složený mechanismus zdvihu sloupu a výložníku jeřábu a v nichž jsou tedy definovány pro úspěšné vyřešení úlohy kinematické analýzy mechanismu jeřábu potřebné rozměry členů mechanismu místo zaoblené válcové plochy, jež se v tomto místě nalézá ve skutečnosti) se podélnou osou systému totožnou s horní podélnou hranou dílu a kladnou poloosou podélné osy směřující k levému konci horní podélné hrany a kladnou poloosou na podélnou osu kolmé příčné osy směřující ke dolní podélné hraně dílu

$a = 4,6 \text{ m}$ Celková délka dolního dílu sloupu(věže) jeřábu – Dílu 1, Poloha kloubu C otáčivě spojujícího Díl 1 s horním dílem věže jeřábu – Dílem 2 na Dílu 1, podélná souřadnice (3.11)

$b = 0,3 \text{ m}$ Celková tloušťka spodního dílu sloupu samostavitelného jeřábu – Dílu 1 (3.12)

$c = 0,1 \text{ m}$ Poloha kloubu A připojení Dílu 1 věže jeřábu k rámu, podélná souřadnice (3.13)

$d = 0,1 \text{ m}$ Poloha kloubu A na spodním dílu věže jeřábu – Dílu 1, příčná souřadnice (3.14)

$e = 1,8 \text{ m}$ Poloha kloubu B hydraul. válce 3 – Válc 3 na Dílu 1, podélná souřadnice (3.15)

$f = 0,08 \text{ m}$ Poloha kloubu B připojujícího hydraulický válec zdvihu sloupu (věže) jeřábu – Válc 3 k Dílu 1 na Dílu 1 věže nad horní podélnou hranou Dílu 1 (příčná souřadnice) (3.16)

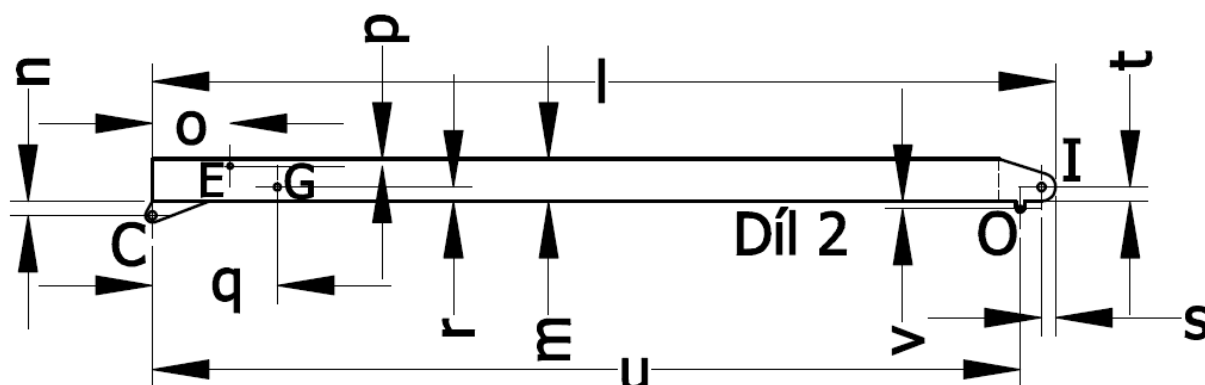
$g = 0,1 \text{ m}$ Poloha kloubu C otáčivě vzájemně spojujícího spodní díl sloupu jeřábu– Díl 1 a horní díl sloupu – Díl 2 na Dílu 1 nad horní podélnou hranou Dílu 1(příčná souřadnice) (3.17)

$h = 0,1 \text{ m}$ Poloha kloubu D vzpěry dolního dílu sloupu na Dílu 1, podélná souřadnice (3.18)

$i = 0,25 \text{ m}$ Poloha kloubu D připojení vzpěry 5 Dílu 1 na Dílu 1, příčná souřadnice (3.19)

$j = 4,3 \text{ m}$ Poloha kloubu M uchycujícího pomocné lano zdvihání výložníku (natačení vzpěry protivýložníku) jeřábu 10 ke spodnímu dílu věže jeřábu na Dílu 1, podélná souřadnice (3.20)

$k = 0,25 \text{ m}$ Poloha kloubu M uchycení pomocného lana zdvihání (natačení vzpěry(ramene)) (proti)výložníku 10 k Dílu 1 věže nad dolní podéln. hranou Dílu 1 (příčná souřadnice) (3.21)



Obr.22: Schéma uvádějící k řešení kinematiky potřebné rozměry horního dílu sloupu jeřábu

Zadané délkové souřadnice polohy kloubových pevných rovinných vazeb (kinematických dvojic) připojujících horní díl sloupu jeřábu – Díl 2 ke spodnímu dílu sloupu – Dílu 1 a táhlu zdvihu (horního dílu) sloupu jeřábu – Táhlo 7 a další díly mechanismu ke Dílu 2 jsou pak s výjimkou rozměrů n , p , s a v vyjádřeny v rámci zadaného kartézského pravoúhlého souřadného systému se počátkem souřadnic umístěným v levém rohu dolní ze podélných hran horního dílu sloupu (věže) jeřábu (ostrou hranou kolmou na navzájem rovnoběžné roviny, v nichž se pohybují členy všechny členy mechanismu zdvihu sloupu a výložníku jeřábu z přepravní do pracovní polohy) se podélnou osou systému totožnou s dolní podélnou hranou dílu a kladnou poloosou podélné osy směřující ke pravému konci dolní ze podélných hran horního dílu sloupu (věže) jeřábu a kladnou poloosou na podélnou osu kolmé příčné osy směřující směrem ke horní ze podélných hran horního dílu sloupu jeřábu.

$l = 6,4 \text{ m}$ Celková délka horního dílu sloupu(věže) samostavitelného jeřábu – Dílu 2 (3.22)

$m = 0,3 \text{ m}$ Tloušťka horního dílu sloupu samostavitelného věžového jeřábu – Dílu 2 (3.23)

$n = 0,1 \text{ m}$ Poloha kloubu C spojujícího dolní díl sloupu – Díl 1 a horní díl sloupu – Díl 2 na Dílu 2 pod dolní podélnou hranou Dílu 2(příčná souřadnice) (podélná souřad. je nula) (3.24)

$o = 0,55 \text{ m}$ Poloha kloubu E vzpěry horního dílu věže na Dílu 2, podélná souřadnice (3.25)

$p = 0,05 \text{ m}$ Poloha kloubu E otáčivě připojovacího vzpěru 6 horního dílu věže jeřábu – Dílu 2 ke hornímu dílu sloupu na Dílu 2 pod horní podélnou hranou dílu (příčná souřadnice) (3.26)

$q = 0,886 \text{ m}$ Poloha kloubu G připojovacího táhlo 7 zdvihu (horního dílu – Dílu 2) sloupu (věže) jeřábu ke hornímu z dílů sloupu jeřábu – Dílu 2 na Dílu 2, podélná souřadnice (3.27)

$r = 0,1 \text{ m}$ Poloha kloubu G uchycení táhla 7 zdvihu věže na Dílu 2, příčná souřadnice (3.28)

$s = 0,1 \text{ m}$ Poloha kloubu I vzájemně otáčivě spojujícího horní díl sloupu – Díl 2 a výložník jeřábu – Výložník 8 na Dílu 2 vlevo od pravé příčné hrany Dílu 2 (podélná souřadnice) (3.29)

$t = 0,1 \text{ m}$ Poloha kloubu I spojení Dílu 2 a Výložníku 8 na Dílu 2, příčná souřadnice (3.30)

$u = 6,15 \text{ m}$ Poloha kloubu O otáčivě připojovacího vzpěru (rameno) protivýložníku jeřábu – Vzpěru 12 k hornímu dílu sloupu (věže) jeřábu – Dílu 2 na Dílu 2, podélná souřadnice (3.31)

$v = 0,05 \text{ m}$ Poloha kloubu O otáčivě připojovacího vzpěru protivýložníku jeřábu – Vzpěru 12 k Dílu 2 sloupu – Dílu 2 na Dílu 2 pod dolní podélnou hranou dílu (příčná souřadnice) (3.32)

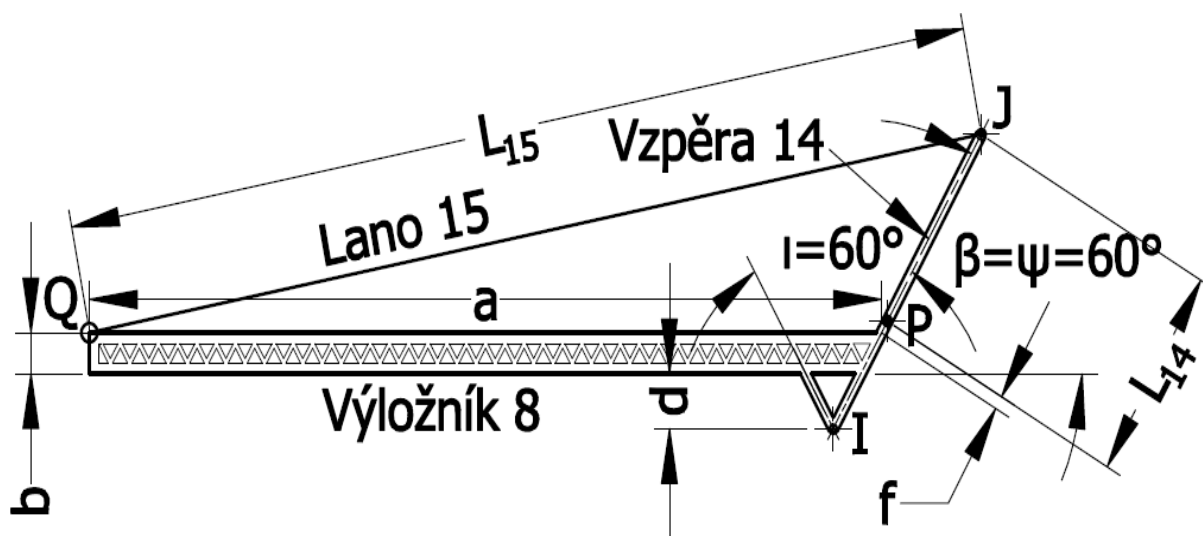
$BF \doteq (2,042 \div 3,335) \text{ m}$ Celková délka hydraulického pístového mechanismu rozevírání a vztyčování dílů sloupu jeřábu do svislé pracovní polohy 3,4, tvořeného hydraulickým válcem rozevírání a vztyčování sloupu jeřábu – Válcem 3 a uvnitř něho posuvně pohyblivě (pomocí posuvné pevné rovinné kinematické vazby (dvojice)) uloženého pístu tohoto válce – Pístu 4 a ohraničeného kloubem B připojujícím Válec 3 k spodnímu dílu sloupu (věže) jeřábu – Dílu 1 a dvojnásobným kloubem F vzájemně otáčivě spojujícího volný ze konců Pístu 4 se opačnými konci vzpěry 5 dolního dílu sloupu a vzpěry 6 horního dílu sloupu jeřábu – Dílu 2, než jsou ty na kterých se nachází klouby otáčivě připojující tyto vzpěry rozevírání sloupu ke příslušným dílům sloupu jeřábu, kde celková délka pístového mechanismu vyjadřuje souřadnici polohy (zmíněného volného konce) Pístu 4 i výše zmíněné posuvné pevné kinematické dvojice mezi Válcem 3 a Pístem 4, kdy pak v podstatě vyjadřuje míru vysunutí pístu ven ze hydraulického válce zdvihu sloupu, která je pak zároveň právě jedinou hnací kinematickou dvojicí celého mechanismu zdvihání sloupu a výložníku jeřábu ze přepravní do pracovní polohy a délka pístového mechanismu je v důsledku pak jedinou nezávisle proměnnou ze souřadnic polohy všech kinematických dvojic celého mechanismu zdvihání sloupu a výložníku jeřábu, kdy pak jde tedy o tzv. souřadnici mechanismu či hnací souřadnici mechanismu složeného rovinného mechanismu zdvihu sloupu jeřábu a výložníku z přepravní do pracovní polohy jeřábu (3.33)

$\Delta BF = BF_{max} - BF_{min} \rightarrow \Delta BF = (3,335 - 2,042) \text{ m} = 1,293 \text{ m}$ Velikost zdvihu pístového mechanismu 3,4 vzájemného rozevírání a vztyčování dílů sloupu (věže) jeřábu tvořeného hydraulickým válcem zdvihání sloupu (věže) jeřábu – Válcem 3 a pístem tohoto válce – Pístem 4 (velikosti zdvihu Pístu 4 hydraulického válce) odpovídající velikosti míry vysunutí (volného konce) Pístu 4 hydraulického válce 3 ven z tohoto hydraulického válce), přičemž velikost vysunutí pístu odpovídající BF_{min} je považována za nulovou a odpovídá přepravní poloze jeřábu s díly sloupu složenými na sobě ve vodorovné poloze na podstavném kříži nebo podvozku představujícím vůči celému mechanismu zdvihu sloupu a výložníku jeřábu nehybný myšlený rám a výložníkem jeřábu ležícím rovněž ve vodorovné poloze a složeným na horním dílu sloupu (věže) jeřábu a velikost vysunutí odpovídající BF_{max} se pak v takovém případě rovná právě vypočtené velikosti zdvihu pístového mechanismu a odpovídá pracovní poloze jeřábu se díly sloupu vztyčenými do svislé polohy a navzájem rozevřenými do přímého úhlu (180°) a výložníkem jeřábu opět ve vodorovné polohy, v tomto případě ovšem kolmé na svislou podélnou osu sloupu samostavitelného sloupového jeřábu (3.34)

$L_5 = 0,75 \text{ m}$ Délka vzpěry 5 spodního dílu sloupu (věže) jeřábu – Dílu 1 (délka úsečky DF mezi kloubovou pevnou rovinnou kinematickou vazbou (dvojicí) D otáčivě připojující vzpěru 5 ke Dílu 1 a dvojnásobnou pevnou kloubovou rovinnou kinematickou vazbou F skládající se z kloubu otáčivě spojujícího volný konec vzpěry se volným koncem Pístu 4 a kloubu otáčivě spojujícího volný ze konců vzpěry 5 se volným koncem vzpěry 6 horního dílu sloupu (3.35)

$L_6 = 0,4 \text{ m}$ Délka vzpěry 6 horního z dílů sloupu (věže) jeřábu – Dílu 2 (délka úsečky DF mezi kloubovou pevnou rovinnou kinematickou vazbou (dvojicí) D otáčivě připojující vzpěru 6 ke Dílu 2 a dvojnásobnou pevnou kloubovou rovinnou kinematickou vazbou F skládající se z kloubu otáčivě spojujícího volný konec vzpěry se volným koncem Pístu 4 a kloubu otáčivě spojujícího volný ze konců vzpěry 6 se volným koncem vzpěry 5 horního dílu sloupu (3.36)

$L_7 = 4,791 \text{ m}$ Délka táhla 7 (horního dílu) sloupu (věže) jeřábu (Dílu 2) (délka úsečky GH mezi kloubovou pevnou rovinnou vazbou G otáčivě připojující táhlo ke hornímu dílu sloupu jeřábu – Dílu 2 a kloubovou pevnou rovinnou vazbou H otáčivě připojující táhlo 7 ke vůči celému mechanismu zdvihu sloupu a výložníku jeřábu nehybnému myšlenému rámu (3.37)



Obr.23: Schéma potřebných rozměrů metadílu výložníku jeřábu, jeho vzpěry a jeho závěsu

Zadané délkové souřadnice polohy kloubových pevných rovinných vazeb (kinematických dvojic) připojujících výložník jeřábu – Výložník 8 ke hornímu dílu sloupu jeřábu – Dílu 2 a kloubu připojujícího vzpěru (rameno) protivýložníku jeřábu – Vzpěru 14 a uchycujícího lano (závěs) výložníku – Lano 15 k Výložníku 8 jsou s výjimkou rozměrů d a f vyjádřeny v rámci zadaného pravoúhlého kartézského souřadného systému s počátkem souřadnic nacházejícím se v samém pravém horním rohu hlavního tělesa výložníku, přičemž pak právě ze tohoto rohu výložníku vychází kratičký výstupek sloužící k připojení Vzpěry 14 prostřednictvím kloubu P, kde tento kratičký výstupek společně s nástavbou výložníku jeřábu ve tvaru rovnostranného trojúhelníku sloužící ke vzájemně otáčivému spojení Dílu 2 a Výložníku 8 prostřednictvím kloubu I nepovažují za to, že by byly součástí hlavního tělesa výložníku jeřábu a počátek souřadnic nachází v průsečíku horní podélné hrany hlavního tělesa výložníku jeřábu a podélné osy tohoto krátkého výstupku, jež pak při fázích vlastního zvedání výložníku jeřábu ze přepravní polohy jeřábu, v níž leží složený na horním dílu sloupu jeřábu do pracovní polohy jeřábu, v níž je kolmý na podélnou osu sloupu jeřábu prostřednictvím natáčení vzpěry (ramene) protivýložníku jeřábu – Vzpěry 12 vzhledem ke hornímu dílu sloupu (věže) jeřábu – Dílu 2, tedy při 1. až 3. fázi zvedání výložníku a natáčení vzpěry protivýložníku, při nichž je pak lano (závěs) výložníku jeřábu zaručeně plně nataženo a táhne, a lze jej bez jakéhokoli dopadu na způsob řešení úlohy kinematické analýzy mechanismu zdvihu sloupu a výložníku jeřábu nahradit absolutně tuhým táhlem 15, je pak podélná osa onoho kratičkého výstupku totožná se podélnou osou vzpěry (ramene) výložníku – Vzpěry 14, přičemž pak podélná osa souřadného systému je totožná s horní podélnou hranou hlavního tělesa výložníku s kladnou poloosou směřující ke levému konci horní podélné hrany a kladnou poloosou na podélnou osu systému kolmé příčné osy směřující směrem ke kratší dolní podélné hraně výložníku jeřábu.

$a = 6,7 \text{ m}$ Celková délka hlavního tělesa výložníku jeřábu – Výložníku 8, do které pak není uvažovaný kratičký výstupek výložníku sloužící pak pro navzájem otáčivé připojení vzpěry (ramene) výložníku jeřábu – Vzpěry 14 ke Výložníku 8 jeřábu prostřednictvím kloubové pevné rovinné kinematické vazby (kinematické dvojice) P a není do ní pak počítána ani nástavba výložníku jeřábu ve tvaru rovnostranného trojúhelníku sloužící pro navzájem otáčivé spojení horního dílu sloupu jeřábu – Dílu 2 a Výložníku 8 jeřábu prostřednictvím kloubové pevné rovinné kinematické vazby (kinematické dvojice) I, poloha kloubové pevné rovinné kinematické vazby (kinematické dvojice) Q uchycující lano(závěs) výložníku jeřábu – Lano 15 ke výložníku jeřábu 8, podélná souřadnice (příčná souřadnice kloubu Q je nulová) (3.38)

$b = 0,3 \text{ m}$ Celková tloušťka hlavního tělesa výložníku jeřábu – Výložníku 8 (3.39)

$\beta = 60^\circ$ Úhel sklonu přímky, na níž leží úsečka vnitřní/pravé šikmé příčné hrany hlavního tělesa výložníku samostavitelného jeřábu – Výložníku 8 vzhledem ke podélné ose zadaného pravoúhlého kartézského souřadného systému Výložníku 8 měřeného pak ve protisměru hodinových ručiček od záporné poloosy této zmíněné podélné osy výložníku jeřábu (3.40)

$d = 0,4 \text{ m}$ Výška nástavby výložníku jeřábu 8 ve tvaru rovnostranného trojúhelníku sloužící pro navzájem otáčivé spojení horního dílu sloupu (věže) samostavitelného jeřábu – Dílu 2 a Výložníku 8 prostřednictvím kloubové pevné rovinné kinematické vazby (dvojice) I, poloha kloubu I na Výložníku 8 pod dolní podélnou hranou výložníku jeřábu kratší než dolní (3.41)

$\iota = 60^\circ$ Vrcholový úhel rovnostranného trojúhelníku nástavby výložníku jeřábu 8 (3.42)

$f = 0,1 \text{ m}$ Délka kratičkého výstupku výložníku jeřábu – Výložníku 8 sloužící pro vzájemně otáčivé připojení vzpěry (ramene) výložníku jeřábu – Vzpěry 14 ke Výložníku 8 jeřábu prostřednictvím kloubové pevné rovinné kinematické vazby (kinematické dvojice) P (3.43)

$\psi = 60^\circ$ Velikost úhlu sklonu podélné osy krátkého výstupku výložníku jeřábu – Výložníku 8 sloužícího ke připojení vzpěry výložníku – Vzpěry 14 k Výložníku 8 jeřábu vzhledem ke podélné ose zadaného kartézského pravoúhlého systému souřadnic Výložníku 8 měřeného ve protisměru hodinových ručiček od záporné poloosy této podélné osy výložníku jeřábu (3.44)

$L_{14} = 1,575 \text{ m}$ Délka vzpěry (ramene) výložníku jeřábu – Vzpěry 14 (délka úsečky JP mezi dvojnásobnou kloubovou pevnou rovinnou vazbou (kin. dvojicí) J uchycující ty konce lana vzpěry protivýložníku jeřábu – Lana 13 a lana výložníku jeřábu – Lana 15 k volnému konci Vzpěry 14, které nejsou uchycena právě ke výložníku či protivýložníku jeřábu a kloubovou pevnou rovinnou vazbou(kin. dvojicí) P otáčivě připojující Vzpěru 14 k Výložníku 8) (3.45)

$L_{15} \doteq 7,676 \text{ m}$ Délka lana (závěsu) (zdvihání) výložníku jeřábu – Lana 15 (při 1. – 3. fázi procesu zdvihání výložníku odpovídající délce úsečky JQ mezi dvojnásobným kloubem J skládajícím se z kloubové vazby otáčivě uchycující volný konec Lana 15 (vzpěry (ramene)) výložníku jeřábu – Výložníku 8 (Vzpěry) 14, ke volnému konci Vzpěry 14 a vazby vzájemně otáčivě spojující volný konec Lana 15 koncem lana (vzpěry (ramene)) protivýložníku jeřábu – Lana 13, který není uchycený ke volnému konci vzpěry protivýložníku jeřábu – Vzpěry 12 (vzájemně otáčivě uchycující výše zmíněný konec Lana 13 ke volnému konci Vzpěry 14) a kloubovou pevnou rovinnou vazbou (kinematickou dvojicí) Q uchycující pak druhý z konců tohoto lana (závěsu) výložníku jeřábu – Lana 15 ke výložníku jeřábu – Výložníku 8) (3.46)

$L_9 \doteq 4,061 \text{ m}$ Délka spodního lana postupného procesu zdvihu výložníku jeřábu (Výložník 8) z vodorovné přepravní polohy, v níž výložník leží složený na horním dílu sloupu jeřábu – Dílu 2 do opět vodorovné pracovní polohy tentokrát kolmé na plně rozevřený a do svislé polohy vztyčený sloup jeřábu (jeho podélnou osu) prostřednictvím natáčení vzpěry (ramene) protivýložníku jeřábu – Vzpěry 12 od Dílu 2 sloupu – Lana 9 (na přechodu ze 1. do 2. fáze v průběhu 2. a 3. fáze procesu i jejich přechodu odpovídající délce úsečky KL mezi kloubovou pevnou rovinnou kinematickou vazbou (kin. dvojicí) K otáčivě uchycujícího Lana 9 ke vůči celému mechanismu rozevírání a vztyčování dílů sloupu ze vodorovné přepravní polohy s díly věže složenými na sobě a ležícími na vodorovném podstavném kříži nebo podvozku jeřábu, jenž je považovaný za vůči celému mechanismu nehybný myšlený rám, a výložníkem ležícím na Dílu 2, do pracovní svislé polohy dílů se díly rozevřenými do přímého úhlu a s výložníkem kolmým na sloup jeřábu, nehybnému rámu a kloubovou pevnou rovinnou vazbou L v rámci 0. fáze procesu zdvihu pouze navzájem spojující volné konce prověšeného Lana 9, prověšeného pomocného lana zdvihání výložníku jeřábu 8 natáčením Vzpěry 12 vůči Dílu 2 – Lana 10 a prověšeného horního lana zdvihu Výložníku 8 natáčením 12 – Lana 11, ve 1. fázi spojující volný z konců prověšeného Lana 9 a části metalana 10+11 zdvihání Výložníku 8 natáčením Vzpěry 12 vůči Dílu 2 sloupu jeřábu tvořeného plně nataženými Lany 10 a 11 ležícími za sebou v jedné přímce a otáčivě uchyceného k dolnímu dílu sloupu jeřábu – Dílu 1 kloubovou pevnou rovinnou vazbou M a dvojnásobnou kloubovou pevnou vazbou N uchyceného ke volnému konci Vzpěry 12 a spojující jej se koncem lana (vzpěry (ramene) protivýložníku) – Lana 13, který není připojen k Vzpěře 14, v 2. fázi představujícího dvojnásobnou kloubovou pevnou rovinnou vazbu spojující navzájem otáčivě volné konce Lana 9, 10 a 11 a ve 3. fázi spojující volný konec prověšeného Lana 10 a části metalana 9+11 tvořeného nataženými Lany 9 a 11 v jedné přímce uchyceného kloubem K k rámu a dvojnásobným kloubem N uchycující metalano k volnému konci Vzpěry 12 a spojující jej se přilehlým ze konců Lanem 13 (3.47)

$L_{10} = 2,7 \text{ m}$ Délka pomocného lana zdvihání výložníku jeřábu (Výložníku 8) ze vodorovné přepravní polohy, se výložníkem složeným na horním dílu věže jeřábu – Dílu 2 do opět vodorovné pracovní polohy tentokrát kolmé na plně rozevřený a vztyčený svislý sloup jeřábu prostřednictvím natáčení vzpěry protivýložníku jeřábu– Vzpěry 12 od Dílu 2 sloupu – Lana 10 (na přechodu ze 0. do 1. fáze v průběhu 1. a 2. fáze i jejich přechodu a na přechodu z 2. do 3. fáze procesu zdvihu výložníku odpovídající délce úsečky ML mezi kloubovou pevnou rovinnou kinematickou vazbou M otáčivě uchycujícího Lana 10 k dolnímu dílu sloupu jeřábu – Dílu 1 a kloubovou pevnou rovinnou vazbou L při 0. fázi jen vzájemně spojujícím volné konce prověšeného dolního lana zdvihu výložníku – Výložníku 8 natáčením Vzpěry 12 vůči Dílu 2 – Lana 9, prověšeného Lana 10 a prověšeného horního lana zdvihání Výložníku 8 natáčením 12 – Lana 11, ve 1. fázi spojující volný konec prověšeného Lana 9 a části metalana 10+11 procesu zdvihu Výložníku 8 natáčením Vzpěry 12 vůči Dílu 2 sloupu jeřábu tvořeného nataženými Lany 10 a 11 ležícími za sebou ve přímce a otáčivě uchyceného k Dílu 1 pevným kloubem M a 2-násobný kloub N uchyceného ke volnému konci Vzpěry 12 a spojující ho s koncem lana– Lana 13, jenž není připojen k Vzpěře 14, v 2. fázi představujícího dvojnásobný kloub spojující navzájem otáčivě volné konce Lana 9, 10 a 11 a v rámci 3. fáze spojující volný konec prověšeného Lana 10 a části metalana 9+11 tvořeného plně nataženými Lany 9 a 11 v jedné přímce uchyceného kloubem K k rámu a dvojnásobným kloubem N uchycujícím metalano ke volnému konci Vzpěry 12 a spojující jej se přilehlým ze konců Lana 13 (3.48)

$L_{11} = 4,85 \text{ m}$ Délka horního lana procesu zdvihu výložníku jeřábu 8 z přepravní polohy, s výložníkem složeným na horním dílu věže– Dílu 2 do pracovní polohy kolmé na svislý sloup jeřábu natáčením vzpěry protivýložníku jeřábu – Vzpěry 12 od Dílu 2 věže – Lana 11 (na přechodu ze 0. do 1. fáze a ve průběhu 1., 2., i 3. fáze zdvihu výložníku i jejich přechodů odpovídající délce úsečky LN mezi pevným kloubem L v rámci 0. fáze procesu zdvihu výložníku jen spojujícím volné konce prověšeného dolního lana zdvihu Výložníku 8 – Lana 9, pomocného lana procesu zdvihu Výložníku 8 – Lana 10 a Lana 11, ve 1. fázi spojující volný z konců prověšeného Lana 9 a části metalana 10+11 zdvihu výložníku natáčením 12 vzhledem k Dílu 2 tvořeného nataženými Lany 10 a 11 do jedné přímky a otáčivě uchyceného ke Dílu 1 kloubovou pevnou vazbou M a dvounásobnou kloubovou pevnou vazbou N uchyceného ke volnému konci Vzpěry 12 a spojující jej se koncem Lana 13, v rámci 2. fáze představujícího 2-násobný kloub Lana 9, 10 a 11 a v 3. fázi spojující volný konec prověšeného Lana 10 a části metalana 9+11 tvořeného nataženými Lany 9 a 11 v přímce uchyceného kloubem K k rámu a dvojnásobným kloubem N uchycujícím metalano k volnému konci Vzpěry 12 a spojující jej s přilehlým koncem Lana 13 a dvojnásobným kloubem N konců Vzpěry 12 a Lana 13 (3.49)

$L_{12} = 1,675 \text{ m}$ Délka vzpěry (ramene) protivýložníku jeřábu – Vzpěry 12 (odpovídají délce úsečky ON mezi kloubovou pevnou rovinnou kinematickou vazbou (dvojicí) O vzájemně otáčivě připojovacího Vzpěru 12 ke hornímu dílu sloupu jeřábu – Dílu 2 a dvojnásobnou kloubovou pevnou rovinnou kinematickou vazbou (dvojicí) N skládající se z pevného kloubu uchycujícího přilehlý konec horního lana zdvihu výložníku jeřábu – Výložníku 8 z vodorovné přepravní polohy složeného na Dílu 2 do opět vodorovné polohy kolmé na plně rozevřený a do svislé polohy vztyčený sloup jeřábu prostřednictvím natáčení Vzpěry 12 od Dílu 2 sloupu – Lana 11, které bývá v rámci 0. fáze prověšené, v rámci 1. fázi tvoří spolu se pomocným lanem zdvihu Výložníku 8 prostřednictvím natáčení Vzpěry 12 vůči Dílu 2 sloupu – Lanem 10 metalano 10+11 zdvihu Výložníku 8 natáčením Vzpěry 12, v 2. fázi pak skutečně táhne jako samostatné horní lano zdvihu výložníku – Lano 11 a ve 3. fázi tvoří společně se dolním lanem zdvihu Výložníku 8 prostřednictvím natáčení Vzpěry 12 vůči Dílu 2 sloupu (věže) jeřábu – s Lanem 9 metalano 9+11 zdvihu výložníku jeřábu 8 volnému z dvou konců vzpěry protivýložníku jeřábu Vzpěry 12 a pevného kloubu uchycujícího přilehlý z dvou konců lana (vzpěry (ramene)) protivýložníku jeřábu – Lana 13 ke volnému ze konců Vzpěry 12 (3.50)

$L_{13} \doteq 3,160 \text{ m}$ Délka lana (vzpěry(ramene)) protivýložníku jeřábu – Lana 13 (odpovídají délce úsečky JN mezi dvojnásobnou kloubovou pevnou rovinnou kinematickou vazbou (kine. dvojicí) J uchycující horní konec Lana 13 k volnému konci vzpěry (ramene) výložníku jeřábu – Vzpěry 14 a spojující jej se volným koncem lana (závěsu) výložníku jeřábu – Lana 15 a dvojnásobnou kloubovou pevnou rovinnou kinematickou vazbou (dvojicí) N připojujícího Lano 13 ke volnému konci vzpěry (ramene) protivýložníku jeřábu – Vzpěry 12 a spojujícího jej se jedním z konců horního lana zdvihání výložníku jeřábu – Výložníku 8 ze horního dílu sloupu jeřábu – Dílu 2 do polohy kolmé na sloup jeřábu natáčením Vzpěry 12 – Lana 11, případně metalana 10+11 zdvihu Výložníku jeřábu 8 při 1. fázi zdvihu výložníku jeřábu nebo metalana zdvihu výložníku 9+11 při 3. fázi zdvihu, jež je pak Lanem 11 také tvořeno (3.51)

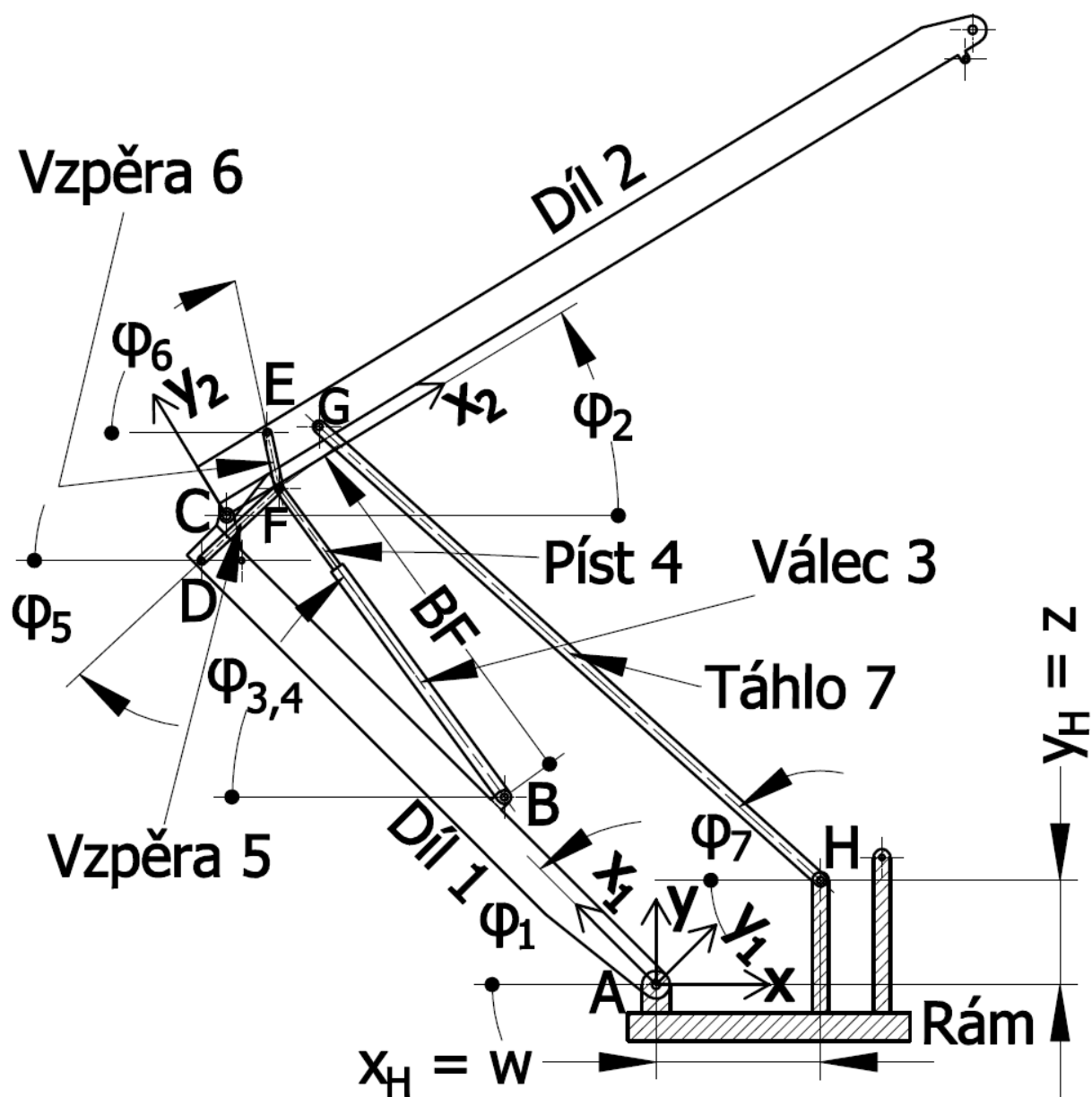
3.3.3 Kinematika rozvírání a vztyčování sloupu a zdvihu výložníku jeřábu

rovinného mechanismu rozvírání a vztyčování spodního a horního dílu sloupu (věže) jeřábu a zvedání (vnitřního dílu) výložníku z jejich přepravní polohy do jejich pracovní polohy

Kinematická analýza složeného rovinného mechanismu sloužícího ke vzájemnému rozvírání spodního a horního dílu sloupu (věže) a horního dílu sloupu a (vnitřního dílu) výložníku samostavitelného sloupového jeřábu a také jejich vztyčování z jejich přepravní polohy, v níž dolní díl leží ve vodorovné poloze na podvozku, na němž se jeřáb dopravuje na pracovní místo, případně pak před začátkem ve této kapitole analyzovaného procesu rozvírání a vztyčování sloupu a zvedání výložníku jeřábu leží spodní díl na kříži nebo kolejovém podvozku, na který pak celý tento mechanismus jeřábu na pracovním místě nehybně stojí nebo se případně s nimi jako jeden tuhý celek spolu se podvozkem unášivě posouvá či se pomocí na kříži či podvozku umístěného patního ložiska představujícího takzvanou dolní otoč mechanismu jeřábu, mechanismus jako tuhý celek vůči podvozku (kříži) i zemskému povrchu relativně natáčí okolo svislé osy kolmé na zemský povrch, dále pak na spodním dílu leží horní díl sloupu, na něm leží vnitřní díl výložníku a na něm vnější díl výložníku, kdy pak jsou velikosti úhlu sklonu těchto hlavních dílů mechanismu vzhledem k vodorovnému vůči složenému rovinnému mechanismu nehybného myšleného rámu, za který pak bývá považován právě zmíněný kříž nebo (kolejový) podvozek, i pak velikosti úhlů vzájemného rozevření spodního a horního dílu sloupu, horního dílu sloupu a vnitřního dílu výložníku a vnitřního a vnějšího dílu výložníku jeřábu (mezer mezi díly) jsou nulové, do jejich pracovní polohy, ve kterých jsou spodní a horní díl plně rozevřené do přímého úhlu (180°) a vztyčeny do svislé polohy, tedy do pravého úhlu vzhledem ke nehybnému rámu, a vnitřní díl výložníku je opět ve vodorovné poloze, avšak v pracovní poloze je výložník kolmý na svislý sloup jeřábu (jeho svislou podélnou osu) a vnější díl výložníku pak v závislosti na maximální požadované velikosti poloměru pomyslné vnější hranice, přičemž tato hranice je představována kružnicí, oblastí, kterou je nutné v rámci pracovní činnosti jeřábu na jeho pracovním místě jeřábem obsluhovat může buď zůstat ležet na vnitřním dílu výložníku, nebo se v případě, že je nutné obsloužit oblast o větším vnějším poloměru, můžou být vnitřní a vnější díl pomocí na výše zmíněném složeném rovinném mechanismu ze hlediska pohybu mechanismu nezávislého složeného rovinného mechanismu, který tvoří i spojovací díl vnitřního a vnějšího dílu výložníku rozevřeny ve přímý úhel, bude provedena prostřednictvím postupné kinematické analýzy jednotlivých podmechanismů (smyček) tohoto mechanismu

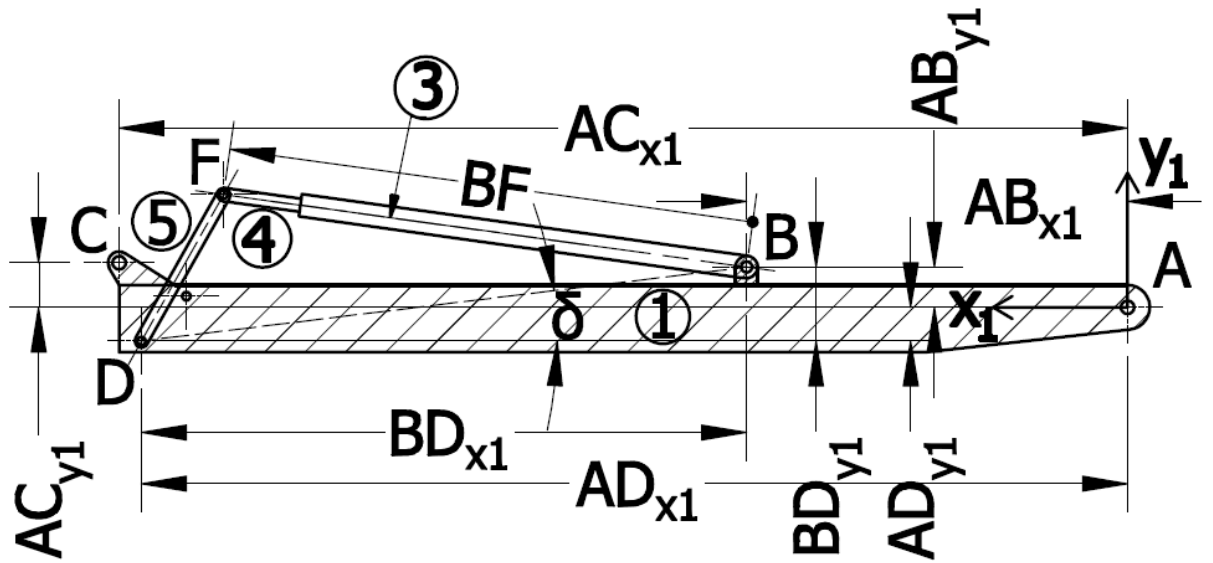
počínající smyčkou (podmechanismem), který pak v rámci sebe obsahuje i hnací kinematickou dvojici zmíněného mechanismu.

3.3.4 Analýza procesu(submechanismu) rozvírání a vztyčování věže jeřábu



Obr.24: Kinematické schéma submechanismu rozvírání a vztyčování dílů sloupu jeřábu

3.3.4.1 Kinematika kulisového podmechanismu hydraulického válce a jeho pístu



Obr.25: Kinematické schéma kulisového podmechanismu odtlačování vzpěry spodního dílu

$$AB_{x_1} = e - c \rightarrow AB_{x_1} = (1,8 - 0,1) \text{ m} = 1,7 \text{ m} \quad (3.52)$$

$$AB_{y_1} = d + f \rightarrow AB_{y_1} = (0,1 + 0,08) \text{ m} = 0,18 \text{ m} \quad (3.53)$$

$$AC_{x_1} = a - c \rightarrow AC_{x_1} = (4,6 - 0,1) \text{ m} = 4,5 \text{ m} \quad (3.54)$$

$$AC_{y_1} = d + g \rightarrow AC_{y_1} = (0,1 + 0,1) \text{ m} = 0,2 \text{ m} \quad (3.55)$$

$$AD_{x_1} = a - c - h \rightarrow AD_{x_1} = (4,6 - 0,1 - 0,1) \text{ m} = 4,4 \text{ m} \quad (3.56)$$

$$AD_{y_1} = d - i \rightarrow AD_{y_1} = (0,1 - 0,25) \text{ m} = -0,15 \text{ m} \quad (3.57)$$

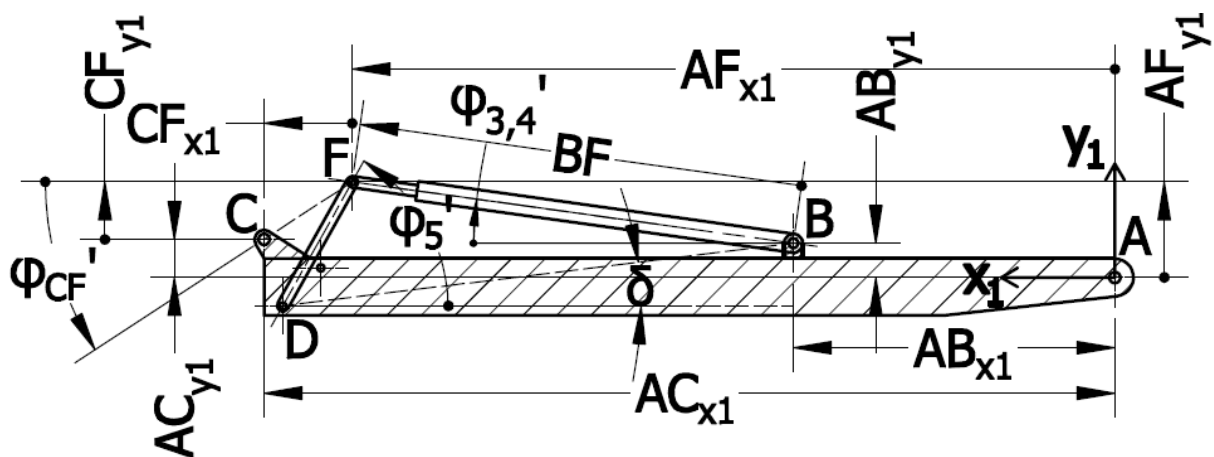
$$BD_{x_1} = |AD_{x_1} - AB_{x_1}| \rightarrow BD_x = |4,4 - 1,7| \text{ m} = 2,7 \text{ m} \quad (3.58)$$

$$BD_{y_1} = |AD_{y_1} - AB_{y_1}| \rightarrow BD_y = |-0,15 - 0,18| \text{ m} = 0,33 \text{ m} \quad (3.59)$$

$$BD = \sqrt{BD_{x_1}^2 + BD_{y_1}^2} \rightarrow BD = \left(\sqrt{2,7^2 + 0,33^2} \right) \text{ m} \doteq 2,720 \text{ m} \quad (3.60)$$

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{BD_{y_1}}{BD_{x_1}} \right) \rightarrow \delta = \tan^{-1} \left(\frac{0,33}{2,7} \right) (\text{rad}) \doteq 0,1216 (\text{rad}) \cong 6,968^\circ \quad (3.61)$$

$$DF = L_5 = 0,75 \text{ m} \quad (3.62)$$



Obr.26: Kinematické schéma kulisového podmechanismu k určení úhlů a polohy kloubu F

$$DF^2 = BD^2 + BF^2 - 2 \cdot BD \cdot BF \cdot \cos \angle DBF \rightarrow \angle DBF = \cos^{-1} \frac{BD^2 + BF^2 - DF^2}{2 \cdot BD \cdot BF} \quad (3.63)$$

$$BF^2 = BD^2 + DF^2 - 2 \cdot BD \cdot DF \cdot \cos \angle BDF \rightarrow \angle BDF = \cos^{-1} \frac{BD^2 + DF^2 - BF^2}{2 \cdot BD \cdot DF} \quad (3.64)$$

$$BD^2 = BF^2 + DF^2 - 2 \cdot BF \cdot DF \cdot \cos \angle BFD \rightarrow \angle BFD = \cos^{-1} \frac{BF^2 + DF^2 - BD^2}{2 \cdot BF \cdot DF} \quad (3.65)$$

$$\varphi'_{3,4} = \angle DBF - \delta \quad (3.66)$$

$$\varphi'_5 = \angle BDF + \delta \quad (3.67)$$

$$AF_{x_1} = AB_{x_1} + BF \cdot \cos \varphi'_{3,4} \quad (3.68)$$

$$AF_{y_1} = AB_{y_1} + BF \cdot \sin \varphi'_{3,4} \quad (3.69)$$

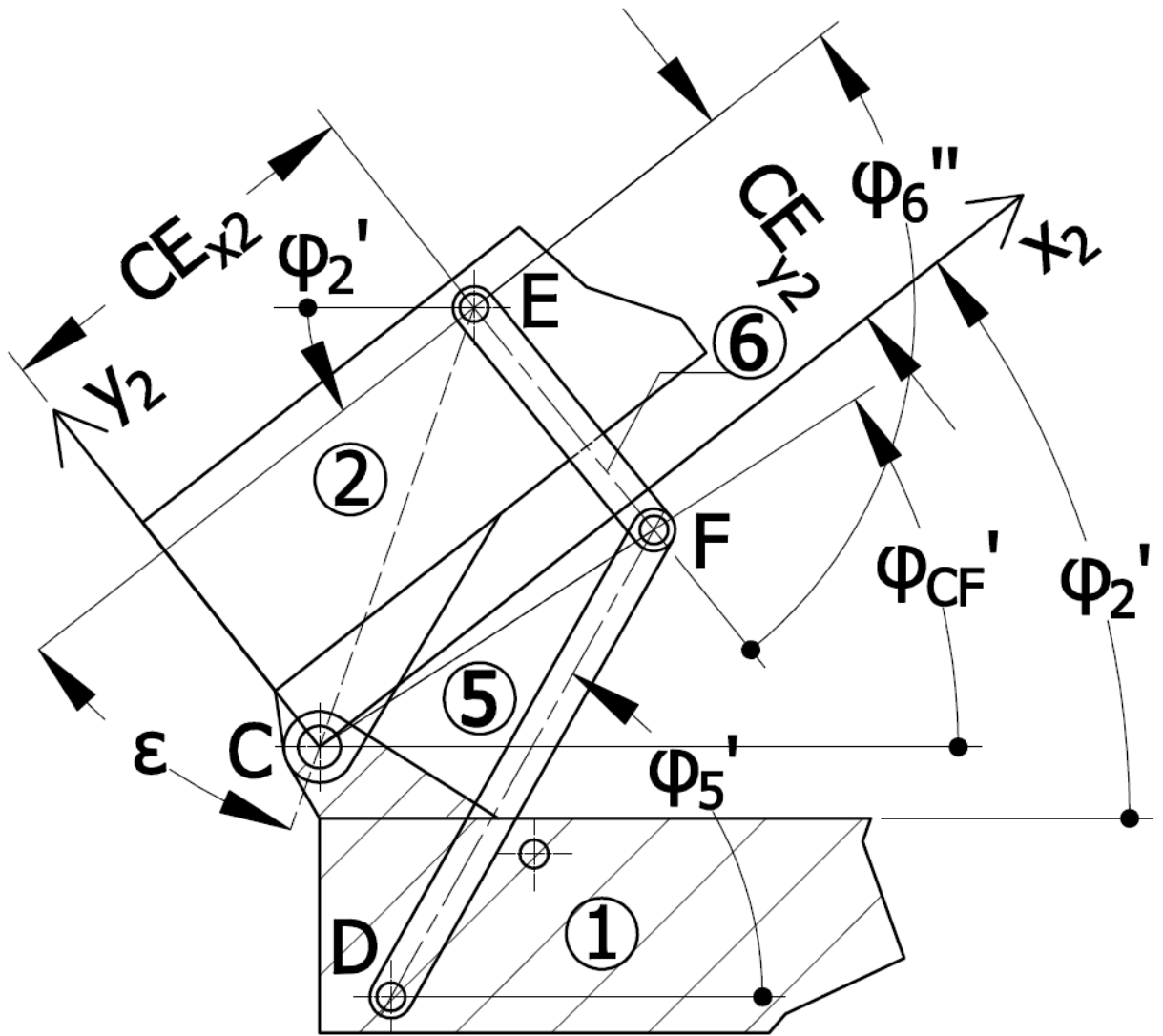
$$CF_{x_1} = AC_{x_1} - AF_{x_1} \quad (3.70)$$

$$CF_{y_1} = AC_{y_1} - AF_{y_1} \quad (3.71)$$

$$CF = \sqrt{CF_{x_1}^2 + CF_{y_1}^2} \quad (3.72)$$

$$\varphi'_{CF} = \tan^{-1} \left(\frac{CF_{y_1}}{CF_{x_1}} \right) \quad (3.73)$$

3.3.4.2 Kinematika čtyřkloubového podmechanismu rozevírání sloupu jeřábu



Obr.27: Kinematické schéma čtyřkloubového podmechanismu rozevírání dílů sloupu jeřábu

$$CE_{x_2} = o = 0,55 \text{ m} \quad (3.74)$$

$$CE_{y_2} = m + n - p \rightarrow CE_{y_2} = (0,3 + 0,1 - 0,05) \text{ m} = 0,35 \text{ m} \quad (3.75)$$

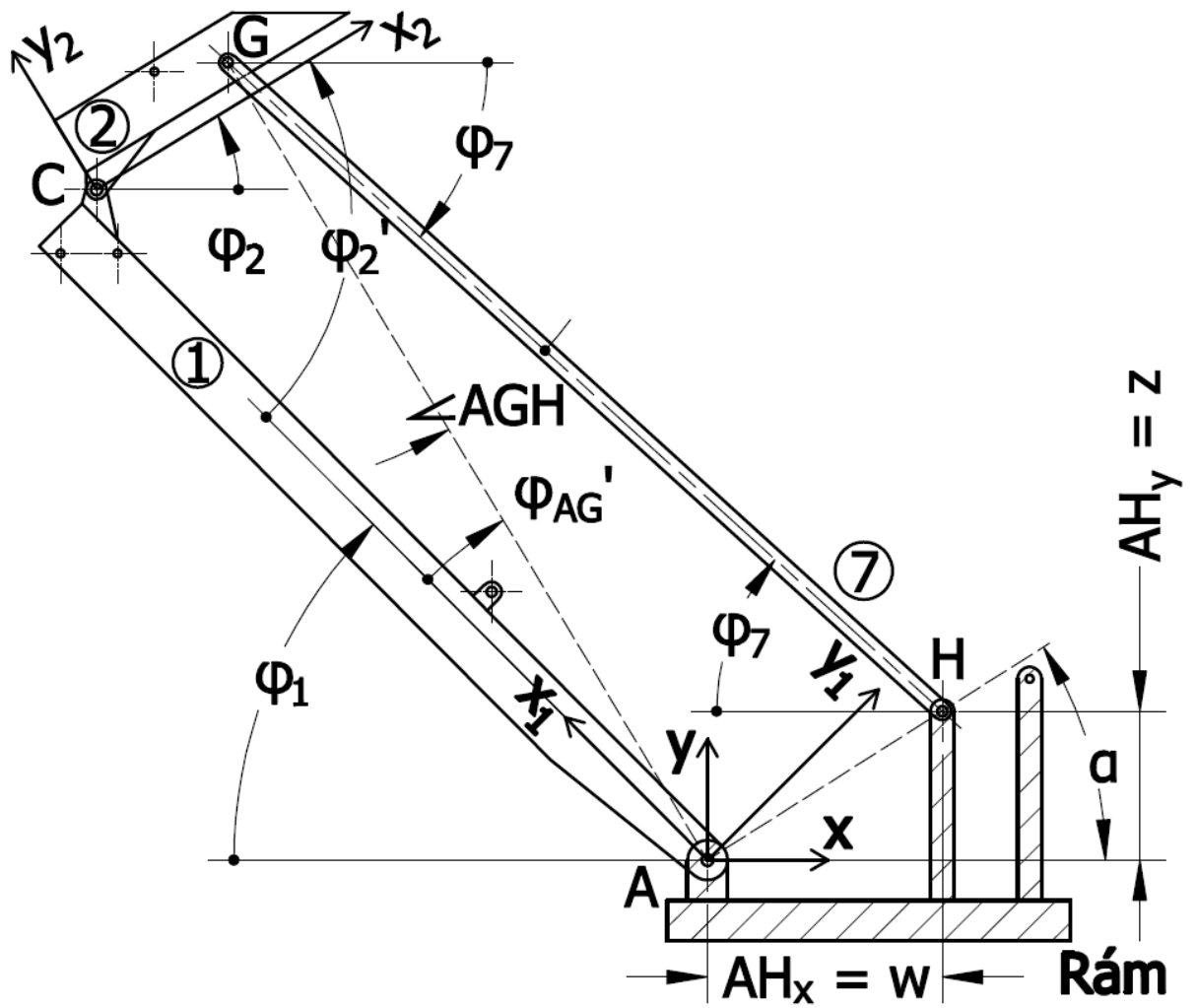
$$CE = \sqrt{CE_{x_2}^2 + CE_{y_2}^2} \rightarrow CE = \left(\sqrt{0,55^2 + 0,35^2} \right) \text{ m} \doteq 0,652 \text{ m} \quad (3.76)$$

$$\varepsilon = \tan^{-1} \left(\frac{CE_{y_2}}{CE_{x_2}} \right) \rightarrow \varepsilon = \tan^{-1} \left(\frac{0,35}{0,55} \right) (\text{rad}) \doteq 0,5667 (\text{rad}) \cong 32,471^\circ \quad (3.77)$$

$$EF = L_6 = 0,4 \text{ m} \quad (3.78)$$

$$CG_{x_2} = q = 0,886 \text{ m} \quad (3.79)$$

3.3.4.3 Kinematika podmechanismu vztyčování dílů sloupu jeřábu do svislé polohy



Obr.29: Kinematické schéma podmechanismu vztyčování dílů sloupu jeřábu do svislé polohy

$$AH_x = v = 1,165 \text{ m} \quad (3.90)$$

$$AH_y = w = 0,739 \text{ m} \quad (3.91)$$

$$AH = \sqrt{AH_x^2 + AH_y^2} \rightarrow AH = \left(\sqrt{1,165^2 + 0,739^2} \right) \text{ m} = 1,380 \text{ m} \quad (3.92)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{AH_y}{AH_x} \right) \rightarrow \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{0,739}{1,165} \right) (\text{rad}) \doteq 0,5653 (\text{rad}) \cong 32,388^\circ \quad (3.93)$$

$$GH = L_7 = 4,791 \text{ m} \quad (3.94)$$

$$GH^2 = AG^2 + AH^2 - 2 \cdot AG \cdot AH \cdot \cos \angle GAH \rightarrow \angle GAH = \cos^{-1} \frac{AG^2 + AH^2 - GH^2}{2 \cdot AG \cdot AH} \quad (3.95)$$

$$AH^2 = AG^2 + GH^2 - 2 \cdot AG \cdot GH \cdot \cos \angle AGH \rightarrow \angle AGH = \cos^{-1} \frac{AG^2 + GH^2 - AH^2}{2 \cdot AG \cdot GH} \quad (3.96)$$

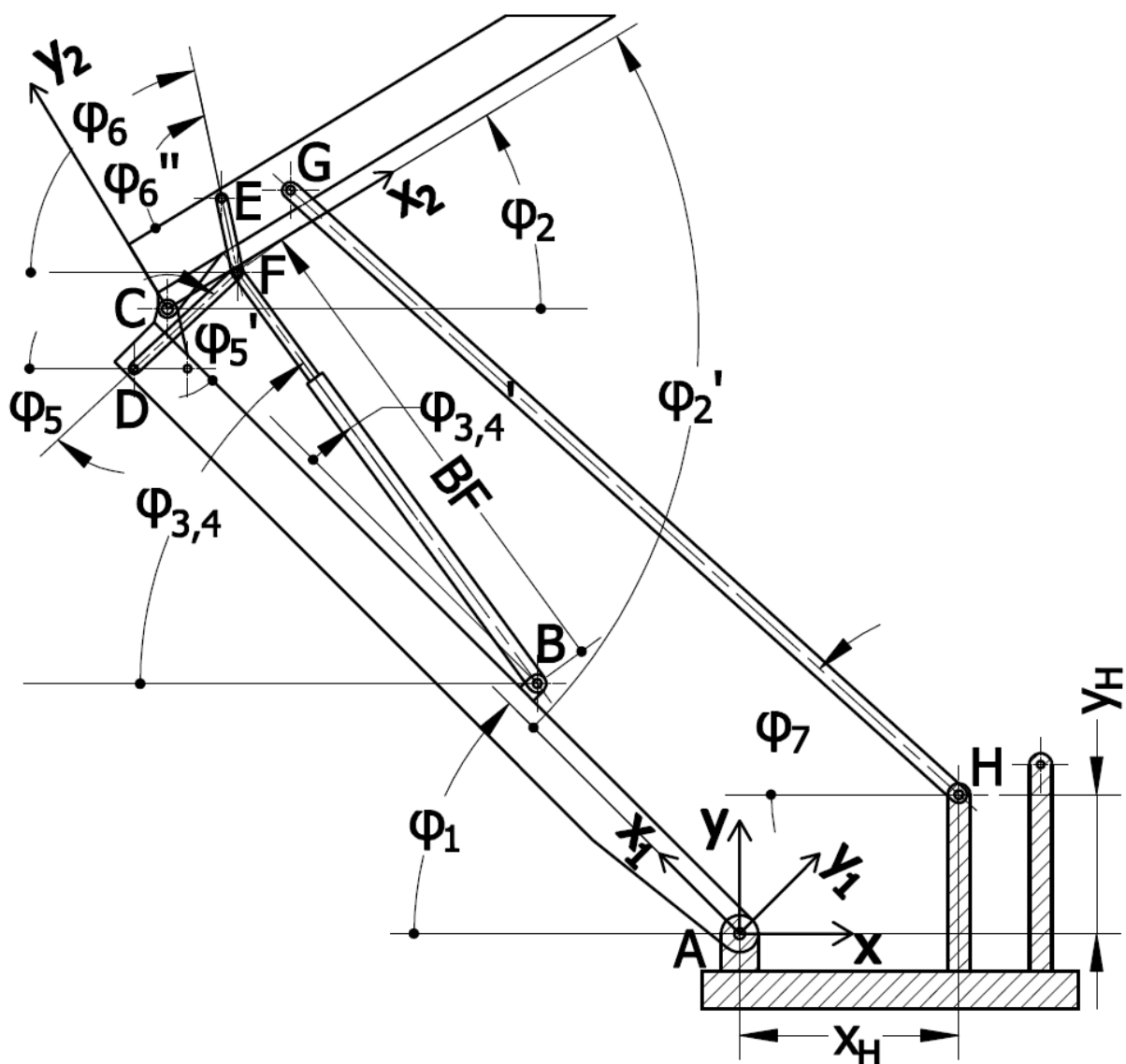
$$AG^2 = AH^2 + GH^2 - 2 \cdot AH \cdot GH \cdot \cos \angle ECF \rightarrow \angle AHG = \cos^{-1} \frac{AH^2 + GH^2 - AG^2}{2 \cdot AH \cdot GH} \quad (3.97)$$

$$\varphi_7 = \angle AHG - \alpha \quad (3.98)$$

$$\varphi_7 + \angle AGH = \varphi_1 + \varphi'_{AG} \rightarrow \varphi_1 = \varphi_7 + \angle AGH - \varphi'_{AG} \quad (3.99)$$

$$\varphi_1 = \angle AHG - \alpha + \angle AGH - \varphi'_{AG} \quad (3.100)$$

3.3.4.4 Odvození vztahů pro funkce úhlů sklonu členů submechanismu vůči rámu



Obr.30: Schéma k odvození vztahů pro úhly sklonu jednotlivých členů submechanismu

$$\varphi_1 = \angle AHG - \alpha + \angle AGH - \varphi'_{AG} \quad (3.101)$$

$$\varphi_2 = \varphi'_2 - \varphi_1 \quad (3.102)$$

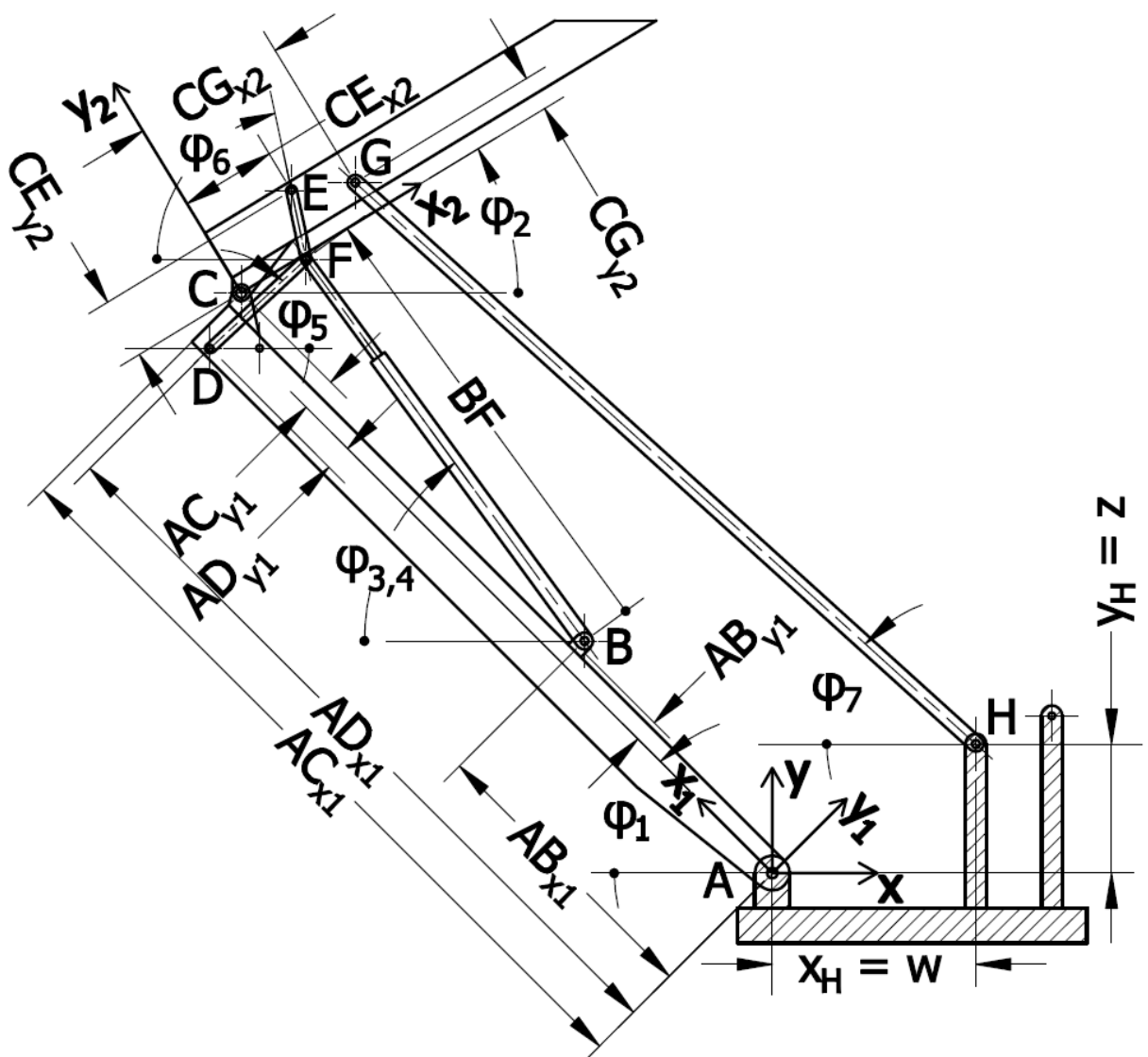
$$\varphi_{3,4} = \varphi_1 + \varphi'_{3,4} \quad (3.103)$$

$$\varphi_5 = \varphi'_5 - \varphi_1 \quad (3.104)$$

$$\varphi_6 = \varphi''_6 - \varphi_2 \quad (3.105)$$

$$\varphi_7 = \angle AHG - \alpha \quad (3.106)$$

3.3.4.5 Stanovení globálních souřadnic kloubů submechanismu v GSS kloubu A



Obr.31: Schéma k odvození globálních souřadnic jednotlivých kloubů submechanismu

$$x_A = y_A = 0 \text{ m} \quad (3.107)$$

$$x_B = -AB_{x_1} \cdot \cos \varphi_1 + AB_{y_1} \cdot \sin \varphi_1 \quad (3.108)$$

$$y_B = AB_{x_1} \cdot \sin \varphi_1 + AB_{y_1} \cdot \cos \varphi_1 \quad (3.109)$$

$$x_C = -AC_{x_1} \cdot \cos \varphi_1 + AC_{y_1} \cdot \sin \varphi_1 \quad (3.110)$$

$$y_C = AC_{x_1} \cdot \sin \varphi_1 + AC_{y_1} \cdot \cos \varphi_1 \quad (3.111)$$

$$x_D = -AD_{x_1} \cdot \cos \varphi_1 + AD_{y_1} \cdot \sin \varphi_1 \quad (3.112)$$

$$y_D = AD_{x_1} \cdot \sin \varphi_1 + AD_{y_1} \cdot \cos \varphi_1 \quad (3.113)$$

$$x_E = x_C + CE_{x_2} \cdot \cos \varphi_2 - CE_{y_2} \cdot \sin \varphi_2 \quad (3.114)$$

$$y_E = y_C + CE_{x_2} \cdot \sin \varphi_2 + CE_{y_2} \cdot \cos \varphi_2 \quad (3.115)$$

$$x_F = x_B - BF \cdot \cos \varphi_3 = x_D + DF \cdot \cos \varphi_5 = x_E + EF \cdot \cos \varphi_6 \quad (3.116)$$

$$y_F = y_B + BF \cdot \sin \varphi_3 = y_D + DF \cdot \sin \varphi_5 = y_E - EF \cdot \sin \varphi_6 \quad (3.117)$$

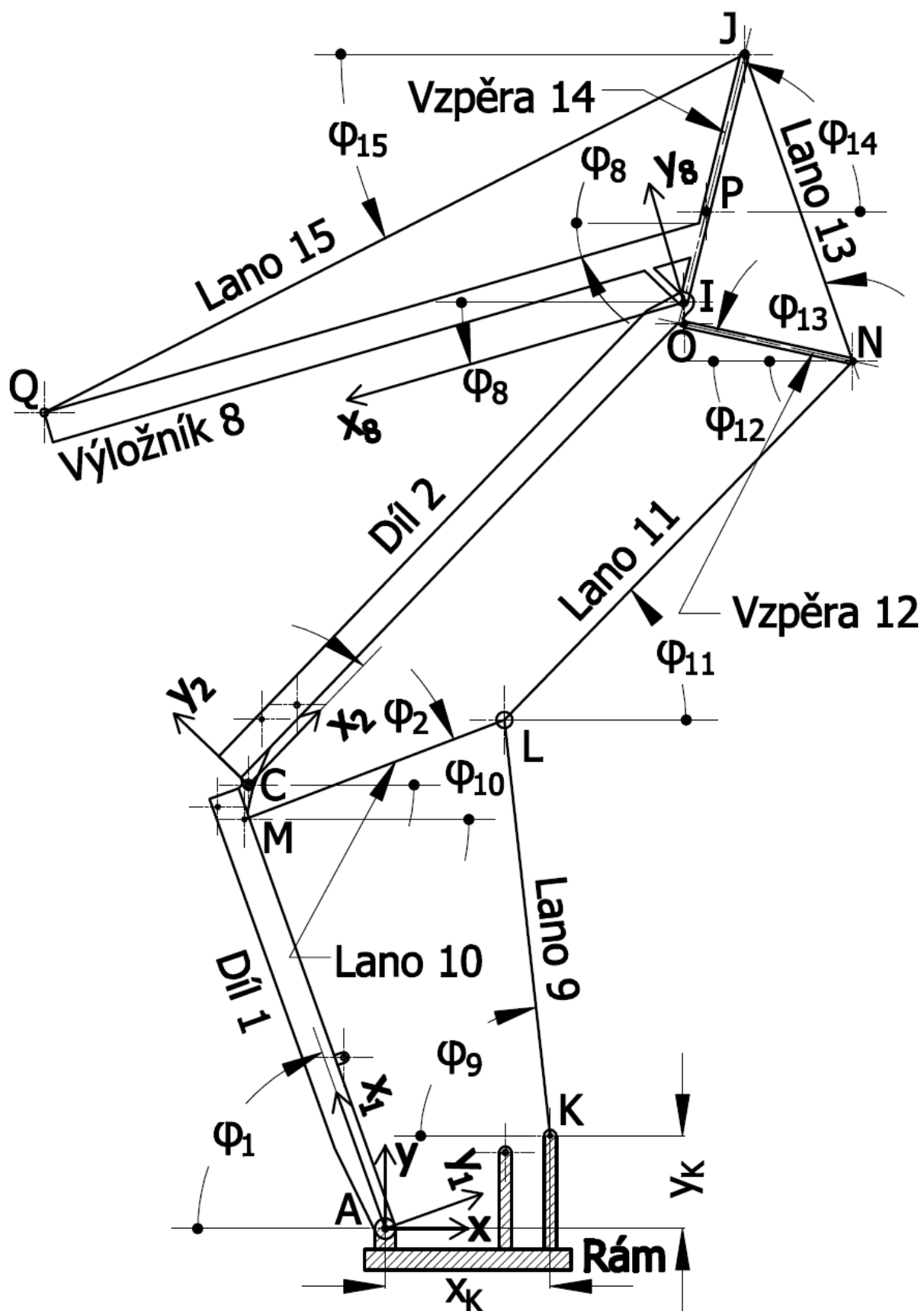
$$x_H = AH_x = w = 1,165 \text{ m} \quad (3.118)$$

$$y_H = AH_y = z = 0,739 \text{ m} \quad (3.119)$$

$$x_G = x_C + CG_{x_2} \cdot \cos \varphi_2 - CG_{y_2} \cdot \sin \varphi_2 = x_H - GH \cdot \cos \varphi_7 \quad (3.120)$$

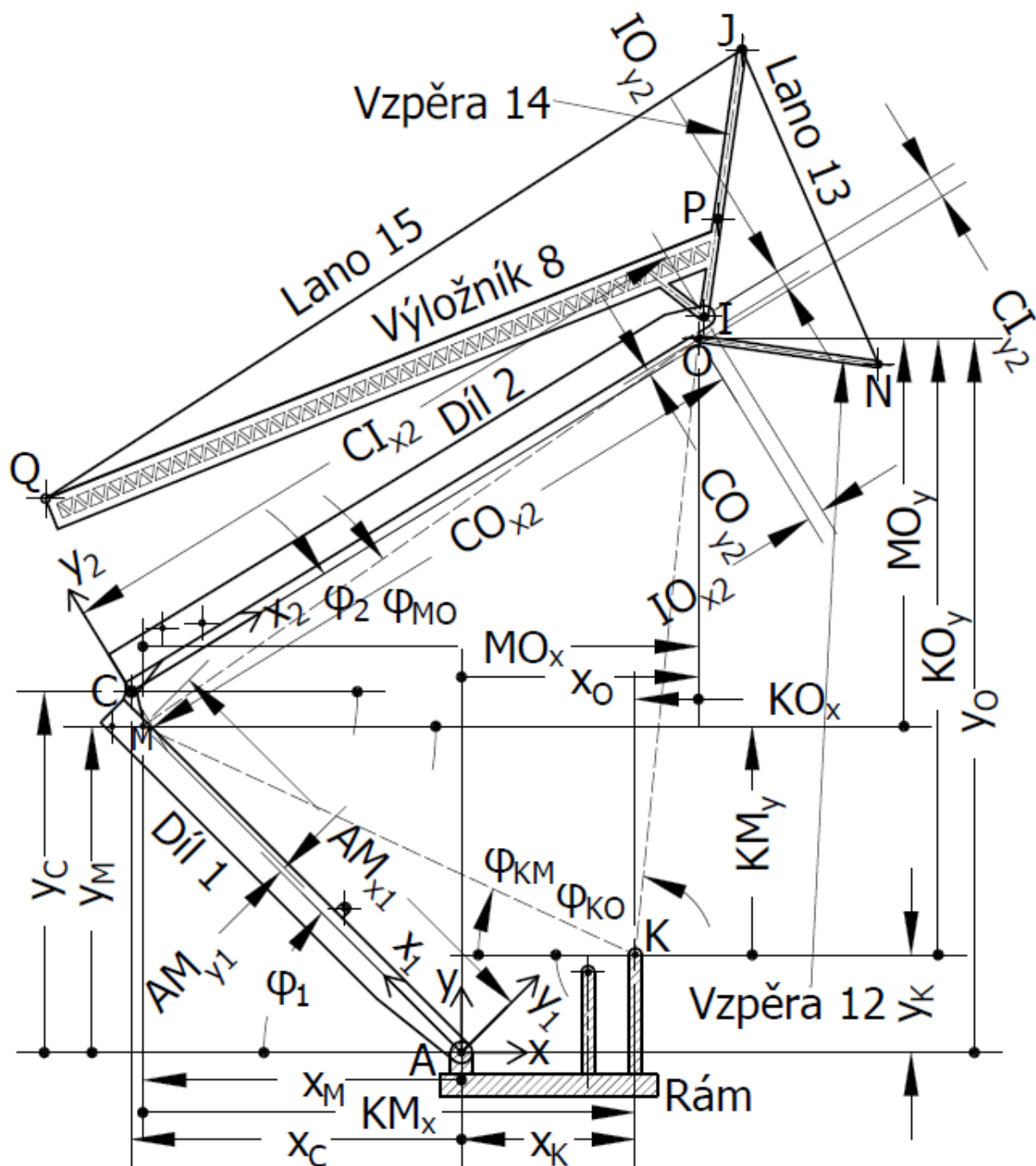
$$y_G = y_C + CG_{x_2} \cdot \sin \varphi_2 + CG_{y_2} \cdot \cos \varphi_2 = y_H + GH \cdot \sin \varphi_7 \quad (3.121)$$

3.3.5 Analýza kinematiky procesu(submechanismu) zdvihu výložníku jeřábu



Obr.32: Kinematické schéma submechanismu zvedání výložníku do polohy kolmé na sloup

3.3.5.1 Určení veličin potřebných k řešení kinematiky procesu zvedání výložníku



Obr.33: Schéma ke stanovení potřebných polohových veličin kloubů dílů sloupu jeřábu

$$x_K = 1,6 \text{ m} \quad (3.122)$$

$$y_K = 0,9 \text{ m} \quad (3.123)$$

$$AM_{x_1} = j - c \rightarrow AM_{x_1} = (4,3 - 0,1) \text{ m} = 4,2 \text{ m} \quad (3.124)$$

$$AM_{y_1} = d - b + k \rightarrow AM_{y_1} = (0,1 - 0,3 + 0,25) \text{ m} = 0,35 \text{ m} \quad (3.125)$$

$$x_M = -AM_{x_1} \cdot \cos \varphi_1 + AM_{y_1} \cdot \sin \varphi_1 \quad (3.126)$$

$$y_M = AM_{x_1} \cdot \sin \varphi_1 + AM_{y_1} \cdot \cos \varphi_1 \quad (3.127)$$

$$KM_x = x_K - x_M \quad (3.128)$$

$$KM_y = y_M - y_K \quad (3.129)$$

$$KM = \sqrt{KM_x^2 + KM_y^2} \quad (3.130)$$

$$\varphi_{KM} = \tan^{-1} \left(\frac{KM_y}{KM_x} \right) \quad (3.131)$$

$$CO_{x_2} = u = 6,15 \text{ m} \quad (3.132)$$

$$CO_{y_2} = n - v \rightarrow CO_{y_2} = (0,1 - 0,05) \text{ m} = 0,05 \text{ m} \quad (3.133)$$

$$x_O = x_C + CO_{x_2} \cdot \cos \varphi_2 - CO_{y_2} \cdot \sin \varphi_2 \quad (3.134)$$

$$y_O = y_C + CO_{x_2} \cdot \sin \varphi_2 + CO_{y_2} \cdot \cos \varphi_2 \quad (3.135)$$

$$KO_x = x_K - x_O \quad (3.136)$$

$$KO_y = y_O - y_K \quad (3.137)$$

$$KO = \sqrt{KO_x^2 + KO_y^2} \quad (3.138)$$

$$\varphi_{KO} = \tan^{-1} \left(\frac{KO_y}{KO_x} \right) \quad (3.139)$$

$$MO_x = x_O - x_M \quad (3.140)$$

$$MO_y = y_O - y_M \quad (3.141)$$

$$MO = \sqrt{MO_x^2 + MO_y^2} \quad (3.142)$$

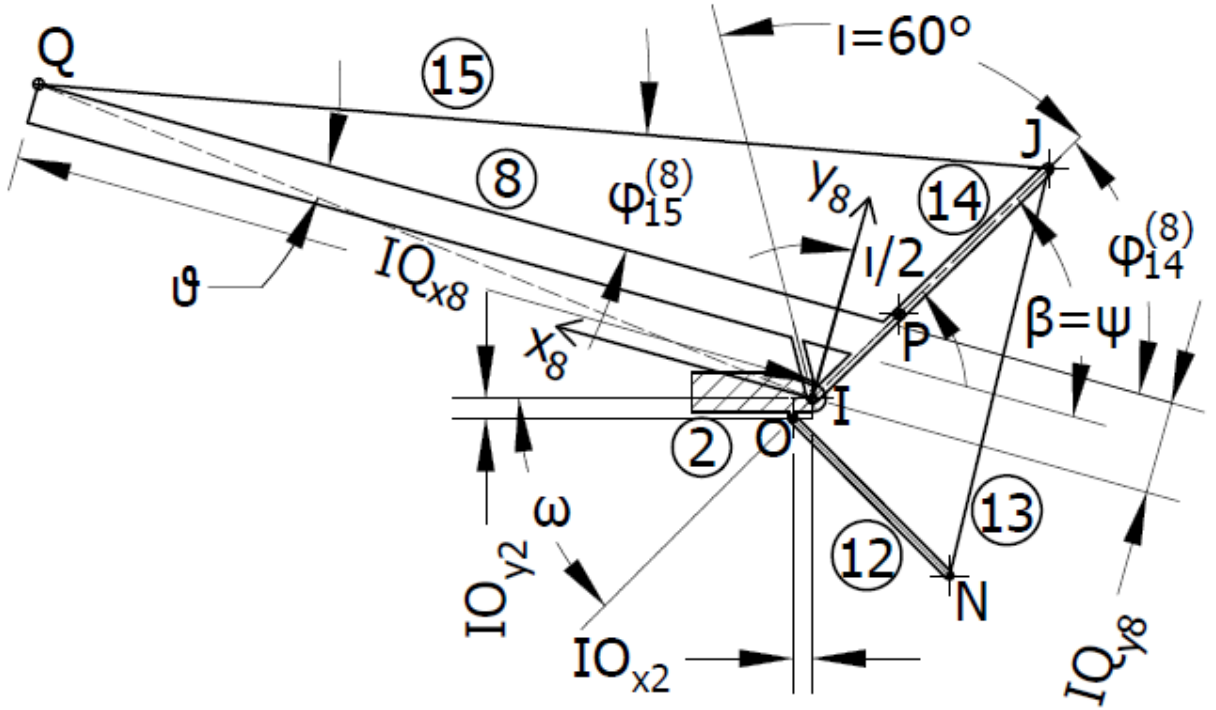
$$\varphi_{MO} = \tan^{-1} \left(\frac{MO_y}{MO_x} \right) \quad (3.143)$$

$$CI_{x_2} = l - s \rightarrow CI_{x_2} = (6,4 - 0,1) \text{ m} = 6,3 \text{ m} \quad (3.144)$$

$$CI_{y_2} = n + t \rightarrow CI_{y_2} = (0,1 + 0,1) \text{ m} = 0,2 \text{ m} \quad (3.145)$$

$$IO_{x_2} = |CI_{x_2} - CO_{x_2}| \rightarrow IO_{x_2} = |6,3 - 6,15| \text{ m} = 0,15 \text{ m} \quad (3.146)$$

$$IO_{y_2} = |CI_{y_2} - CO_{y_2}| \rightarrow IO_{y_2} = |0,2 - 0,05| \text{ m} = 0,15 \text{ m} \quad (3.147)$$



Obr.34: Schéma potřebných polohových veličin čtyřkloubového mechanismu výložníku

$$IO = \sqrt{IO_{x_2}^2 + IO_{y_2}^2} \rightarrow IO = \left(\sqrt{0,15^2 + 0,15^2} \right) \text{ m} \doteq 0,212 \text{ m} \quad (3.148)$$

$$\omega = \tan^{-1} \left(\frac{IO_{y_2}}{IO_{x_2}} \right) \rightarrow \omega = \tan^{-1} \left(\frac{0,15}{0,15} \right) (\text{rad}) = \frac{\pi}{4} (\text{rad}) = 45^\circ \quad (3.149)$$

$$IP = \frac{d}{\cos \frac{l}{2}} + \frac{b}{\sin \beta} + f \rightarrow IP = \left(\frac{0,4}{\cos \frac{\pi}{3 \cdot 2}} + \frac{0,3}{\sin \frac{\pi}{3}} + 0,1 \right) \text{ m} \doteq 0,908 \text{ m} \quad (3.150)$$

$$JP = L_{14} = 1,575 \text{ m} \quad (3.151)$$

$$IJ = IP + JP \rightarrow IJ \cong (0,908 + 1,575) \text{ m} \cong 2,483 \text{ m} \quad (3.152)$$

$$\varphi_{14}^{(8)} = \beta = \frac{\pi}{2} - \frac{l}{2} = 90^\circ - \frac{l}{2} = \psi \quad (3.153)$$

$$\varphi_{14}^{(8)} = 60^\circ = 90^\circ - \frac{60^\circ}{2} = 60^\circ = \frac{\pi}{3} (\text{rad}) = \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{3 \cdot 2} \right) (\text{rad}) = \frac{\pi}{3} (\text{rad}) \quad (3.154)$$

$$JN = L_{13} \doteq 3,160 \text{ m} \quad (3.155)$$

$$NO = L_{12} = 1,675 \text{ m} \quad (3.156)$$

$$IQ_{x_8} = -d \tan \frac{\iota}{2} - \frac{b}{\tan \beta} + a \rightarrow IQ_{x_8} = \left(-0,4 \tan \frac{\pi}{3 \cdot 2} - \frac{0,3}{\tan \frac{\pi}{3}} + 6,7 \right) \text{ m} \doteq 6,296 \text{ m} \quad (3.157)$$

$$IQ_{y_8} = d + b \rightarrow IQ_{y_8} = (0,4 + 0,3) \text{ m} = 0,7 \text{ m} \quad (3.158)$$

$$IQ = \sqrt{IQ_{x_8}^2 + IQ_{y_8}^2} \rightarrow IQ \cong \left(\sqrt{6,296^2 + 0,15^2} \right) \text{ m} \cong 6,335 \text{ m} \quad (3.159)$$

$$\vartheta = \tan^{-1} \left(\frac{IQ_{y_8}}{IQ_{x_8}} \right) \rightarrow \vartheta \cong \tan^{-1} \left(\frac{0,7}{6,296} \right) (\text{rad}) \cong 0,110 \, 7 (\text{rad}) \cong 6,344^\circ \quad (3.160)$$

$$JQ = L_{15} \doteq 7,676 \text{ m} \quad (3.161)$$

$$JQ^2 = IJ^2 + IQ^2 - 2 \cdot IJ \cdot IQ \cdot \cos \angle JIQ \rightarrow \angle JIQ = \cos^{-1} \frac{IJ^2 + IQ^2 - JQ^2}{2 \cdot IJ \cdot IQ} \quad (3.162)$$

$$\angle JIQ \cong \cos^{-1} \left(\frac{2,483^2 + 6,335^2 - 7,676^2}{2 \cdot 2,483 \cdot 6,335} \right) (\text{rad}) \cong 1,983 \, 7 (\text{rad}) \cong 113,656^\circ \quad (3.163)$$

$$IQ^2 = IJ^2 + JQ^2 - 2 \cdot IJ \cdot IQ \cdot \cos \angle IJQ \rightarrow \angle IJQ = \cos^{-1} \frac{IJ^2 + JQ^2 - IQ^2}{2 \cdot IJ \cdot JQ} \quad (3.164)$$

$$\angle IJQ \cong \cos^{-1} \left(\frac{2,483^2 + 7,676^2 - 6,335^2}{2 \cdot 2,483 \cdot 7,676} \right) (\text{rad}) \cong 0,857 \, 1 (\text{rad}) \cong 49,107^\circ \quad (3.165)$$

$$IJ^2 = IQ^2 + JQ^2 - 2 \cdot IQ \cdot JQ \cdot \cos \angle IQJ \rightarrow \angle IQJ = \cos^{-1} \frac{IQ^2 + JQ^2 - IJ^2}{2 \cdot IQ \cdot JQ} \quad (3.166)$$

$$\angle IQJ \cong \cos^{-1} \left(\frac{6,335^2 + 7,676^2 - 2,483^2}{2 \cdot 6,335 \cdot 7,676} \right) (\text{rad}) \cong 0,300 \, 9 (\text{rad}) \cong 17,238^\circ \quad (3.167)$$

$$\varphi_{15}^{(8)} = \angle IQJ - \vartheta \rightarrow \varphi_{15}^{(8)} \cong (0,300 \, 9 - 0,110 \, 7) (\text{rad}) \cong 0,190 \, 1 (\text{rad}) \cong 10,893^\circ \quad (3.168)$$

$$JO_0^2 = IJ^2 + IO^2 - 2IJ \cdot IO \cos(2\pi - \angle JIO_0) = IJ^2 + IO^2 - 2IJ \cdot IO \cos(\angle JIO_0) \quad (3.171)$$

$$JO_0 \cong \left(\sqrt{2,483^2 + 0,212^2 - 2 \cdot 2,483 \cdot 0,212 \cdot \cos\left(\frac{13\pi}{12}\right)} \right) \text{ m} \cong 2,689 \text{ m} \quad (3.172)$$

$$IJ^2 = IO^2 + JO_0^2 - 2 \cdot IO \cdot JO_0 \cdot \cos \angle IOJ_0 \rightarrow \angle IOJ_0 = \cos^{-1} \frac{IO^2 + JO_0^2 - IJ^2}{2 \cdot IO \cdot JO_0} \quad (3.173)$$

$$\angle IOJ_0 \cong \cos^{-1} \left(\frac{0,212^2 + 2,689^2 - 2,483^2}{2 \cdot 0,212 \cdot 2,689} \right) (\text{rad}) \cong 0,2414 (\text{rad}) \cong 13,830^\circ \quad (3.174)$$

$$NO^2 = JN^2 + JO_0^2 - 2JN \cdot JO_0 \cos \angle NJO_0 \rightarrow \angle NJO_0 = \cos^{-1} \frac{JN^2 + JO_0^2 - NO^2}{2 \cdot JN \cdot JO_0} \quad (3.175)$$

$$\angle NJO_0 \cong \cos^{-1} \left(\frac{3,160^2 + 2,689^2 - 1,675^2}{2 \cdot 3,160 \cdot 2,689} \right) (\text{rad}) \cong 0,5587 (\text{rad}) \cong 32,011^\circ \quad (3.176)$$

$$JO_0^2 = JN^2 + NO^2 - 2JN \cdot NO \cos \angle JNO_0 \rightarrow \angle JNO_0 = \cos^{-1} \frac{JN^2 + NO^2 - JO_0^2}{2 \cdot JN \cdot NO} \quad (3.177)$$

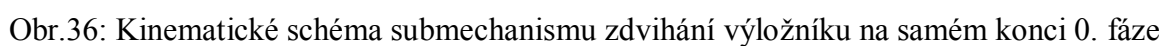
$$\angle JNO_0 \cong \cos^{-1} \left(\frac{3,160^2 + 1,675^2 - 2,689^2}{2 \cdot 3,160 \cdot 1,675} \right) (\text{rad}) \cong 1,0177 (\text{rad}) \cong 58,309^\circ \quad (3.178)$$

$$JN^2 = JO_0^2 + NO^2 - 2JO_0 \cdot NO \cos \angle JON_0 \rightarrow \angle JON_0 = \cos^{-1} \frac{JO_0^2 + NO^2 - JN^2}{2 \cdot JO_0 \cdot NO} \quad (3.179)$$

$$\angle JON_0 \cong \cos^{-1} \left(\frac{2,689^2 + 1,675^2 - 3,160^2}{2 \cdot 2,689 \cdot 1,675} \right) (\text{rad}) \cong 1,5652 (\text{rad}) \cong 89,680^\circ \quad (3.180)$$

$$\varphi''_{12,0} = \angle JON_0 - \angle IOJ_0 - \omega \quad (3.181)$$

$$\varphi''_{12,0} \cong \left(\frac{13\pi}{12} - 0,2414 - \frac{\pi}{4} \right) (\text{rad}) \cong 0,5384 (\text{rad}) \cong 30,850^\circ \quad (3.182)$$



$$x_{N,0} = x_O + NO \cdot \cos \varphi_{12,0} \quad (3.184)$$

$$y_{N,0} = x_O - NO \cdot \sin \varphi_{12,0} \quad (3.185)$$

$$MN_{x,0} = x_{N,0} - x_M \quad (3.186)$$

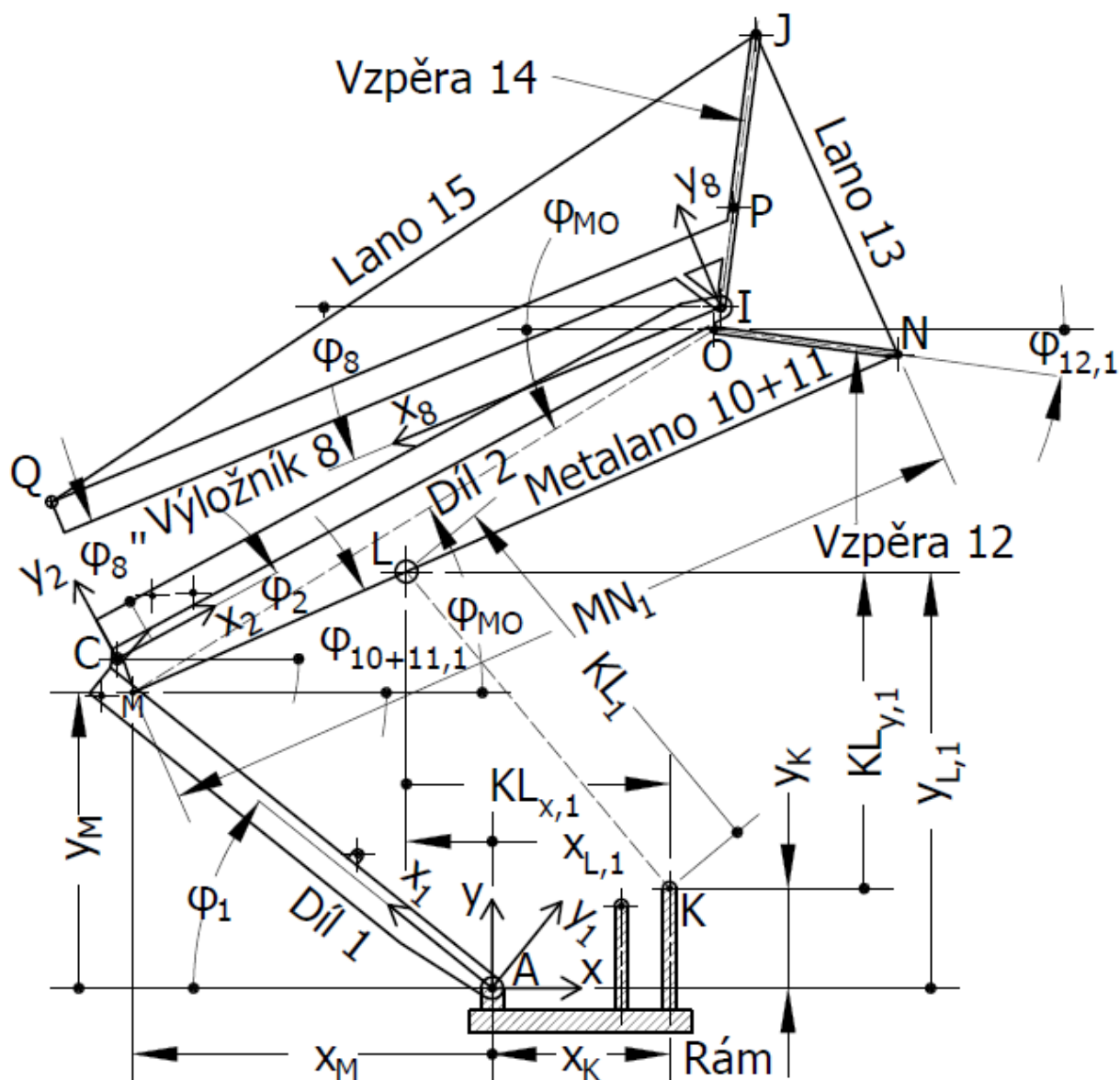
$$MN_{y,0} = y_{N,0} - y_M \quad (3.187)$$

$$MN_0 = \sqrt{MN_{x,0}^2 + MN_{y,0}^2} \quad (3.188)$$

$$MN_0 \geq L_{10} + L_{11} \rightarrow MN_0 - L_{10} - L_{11} \geq 0 \quad (3.189)$$

$$\Delta MN_0 = KL_1 - L_{10} - L_{11} \rightarrow \Delta MN_0 \geq 0 \quad (3.190)$$

3.3.5.3 Kinematická analýza 1. fáze procesu zdvihání výložníku jeřábu



Obr.37: Kinematické schéma 1. fáze procesu zvedání výložníku do polohy kolmé na sloup

$$LM_1 = L_{10} = 2,7 \text{ m} \quad (3.191)$$

$$LN_1 = L_{11} = 4,85 \text{ m} \quad (3.192)$$

$$MN_1 = L_{10} + L_{11} = LM_1 + LN_1 \rightarrow MN_1 = (2,7 + 4,85) \text{ m} = 7,55 \text{ m} \quad (3.193)$$

$$NO^2 = MN_1^2 + MO^2 - 2MN_1 \cdot MO \cos \angle NMO_1 \rightarrow \angle NMO_1 = \cos^{-1} \frac{MN_1^2 + MO^2 - NO^2}{2 \cdot MN_1 \cdot MO} \quad (3.194)$$

$$MO^2 = MN_1^2 + NO^2 - 2MN_1 \cdot NO \cos \angle MNO_1 \rightarrow \angle MNO_1 = \cos^{-1} \frac{MN_1^2 + NO^2 - MO^2}{2 \cdot MN_1 \cdot NO} \quad (3.195)$$

$$MN_1^2 = MO^2 + NO^2 - 2MO \cdot NO \cos \angle MON_1 \rightarrow \angle MON_1 = \cos^{-1} \frac{MN_1^2 + NO^2 - MO^2}{2 \cdot MN_1 \cdot NO} \quad (3.196)$$

$$\varphi_{10+11,1} = \varphi_{MO} - \angle NMO_1 \quad (3.197)$$

$$\varphi_{12,1} = \pi - \varphi_{MO} - \angle MON_1 \quad (3.198)$$

$$x_{L,1} = x_M + LM_1 \cdot \cos \varphi_{10+11,1} \quad (3.199)$$

$$y_{L,1} = y_M + LM_1 \cdot \sin \varphi_{10+11,1} \quad (3.200)$$

$$KL_{x,1} = x_{L,1} - x_K \quad (3.201)$$

$$KL_{y,1} = y_{L,1} - y_K \quad (3.202)$$

$$KL_1 = \sqrt{KL_{x,1}^2 + KL_{y,1}^2} \quad (3.203)$$

$$KL_1 \geq L_9 \rightarrow KL_1 - L_9 \geq 0 \quad (3.204)$$

$$\Delta KL_1 = KL_1 - L_9 \rightarrow \Delta KL_1 \geq 0 \quad (3.205)$$

$$KM^2 = KL_2^2 + LM_2^2 - 2KL_2LM_2 \cos \angle KLM_2 \rightarrow \angle KLM_2 = \cos^{-1} \frac{KL_2^2 + LM_2^2 - KM^2}{2 \cdot KL_2 \cdot LM_2}$$

$$KL_2^2 = KM^2 + LM_2^2 - 2KMLM_2 \cos \angle KML_2 \rightarrow \angle KML_2 = \cos^{-1} \frac{KM^2 + LM_2^2 - KL_2^2}{2 \cdot KM_2 \cdot LM_2}$$

$$\varphi_{9,2} = \varphi_{KM} + \angle LKM_2$$

$$\varphi_{10,2} = \angle KML_2 - \varphi_{KM}$$

$$x_{L,2} = x_M + LM_2 \cdot \cos \varphi_{10,2}$$

$$y_{L,2} = y_M + LM_2 \cdot \sin \varphi_{10,2}$$

$$LO_{x,2} = x_O - x_{L,2}$$

$$LO_{y,2} = y_O - y_{L,2}$$

$$LO_2 = \sqrt{LO_{x,2}^2 + LO_{y,2}^2}$$

$$\varphi_{LO,2} = \tan^{-1} \left(\frac{LO_{y,2}}{LO_{x,2}} \right)$$

$$LN_2 = L_{11} = 4,85 \text{ m}$$

$$NO^2 = LN_2^2 + LO_2^2 - 2LN_2LO_2 \cos \angle NKO_2 \rightarrow \angle NLO_2 = \cos^{-1} \frac{LN_2^2 + LO_2^2 - NO^2}{2 \cdot LN_2 \cdot LO_2}$$

$$LO_2^2 = LN_2^2 + NO^2 - 2LN_2NO \cos \angle NKO_2 \rightarrow \angle LNO_2 = \cos^{-1} \frac{LN_2^2 + NO^2 - LO_2^2}{2 \cdot LN_2 \cdot NO}$$

$$LN_2^2 = LO_2^2 + NO^2 - 2LO_2NO \cos \angle NKO_2 \rightarrow \angle LON_2 = \cos^{-1} \frac{LO_2^2 + NO^2 - LN_2^2}{2 \cdot LO_2 \cdot NO}$$

$$\varphi_{11,2} = \varphi_{LO,2} - \angle NLO_2$$

$$\varphi_{12,2} = \pi - \varphi_{LO,2} - \angle LON_2$$

$$x_{N,2} = x_O + NO \cdot \cos \varphi_{12,2}$$

$$y_{N,2} = y_O - NO \cdot \sin \varphi_{12,2}$$

$$KN_{x,2} = x_K - x_{N,2}$$

$$KM_{y,2} = y_N - y_K$$

$$\varphi_{KN,2} = \tan^{-1} \left(\frac{KN_{y,2}}{KN_{x,2}} \right)$$

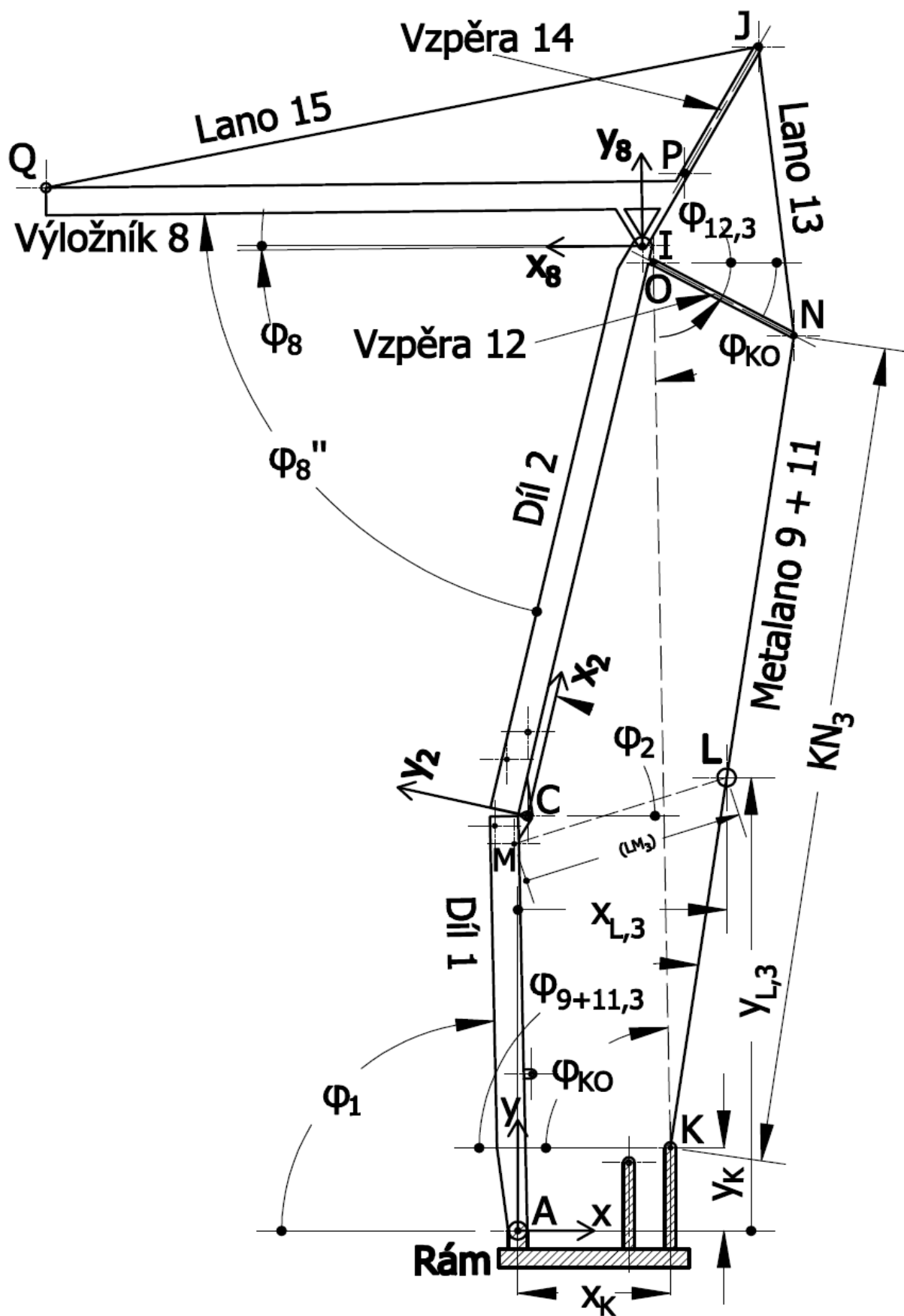
$$\varphi_{9,2} \geq \varphi_{KN,2} \rightarrow \varphi_{9,2} - \varphi_{KN,2} \geq 0$$

$$\Delta\varphi_{KN,2} = \varphi_{9,2} - \varphi_{KN,2} \rightarrow \Delta\varphi_{KN,2} \geq 0$$

$$\pi - \varphi_{9,2} \leq \varphi_{11,2} \rightarrow \pi - \varphi_{9,2} - \varphi_{11,2} \leq 0$$

$$\Delta\varphi_{9-11,2} = \pi - \varphi_{9,2} - \varphi_{11,2} \rightarrow \Delta\varphi_{9-11,2} \leq 0$$

3.3.5.5 Kinematika 3. fáze zdvihu výložníku jeřábu z přepravní do pracovní polohy



Obr.39: Schéma 3. fáze zdvihu výložníku z horního dílu sloupu do polohy kolmé na sloup

$$KL_3 = L_9 \doteq 4,061 \text{ m}; LN_3 = L_{11} = 4,85 \text{ m}$$

$$KN_3 = L_{10} + L_{11} = KL_3 + LN_3 \rightarrow MN_3 = (4,061 + 4,85) \text{ m} = 8,911 \text{ m}$$

$$NO^2 = KN_3^2 + KO^2 - 2KN_3KO \cos \angle NKO_3 \rightarrow \angle NKO_3 = \cos^{-1} \frac{KN_3^2 + KO^2 - NO^2}{2 \cdot KN_3 \cdot KO}$$

$$KO^2 = KN_3^2 + NO^2 - 2KN_3NO \cos \angle KNO_3 \rightarrow \angle KNO_3 = \cos^{-1} \frac{KN_3^2 + NO^2 - KO^2}{2 \cdot KN_3 \cdot NO}$$

$$KN_3^2 = KO^2 + NO^2 - 2KON_3 \cos \angle KON_3 \rightarrow \angle KON_3 = \cos^{-1} \frac{KO^2 + NO^2 - KN_3^2}{2 \cdot KO \cdot NO}$$

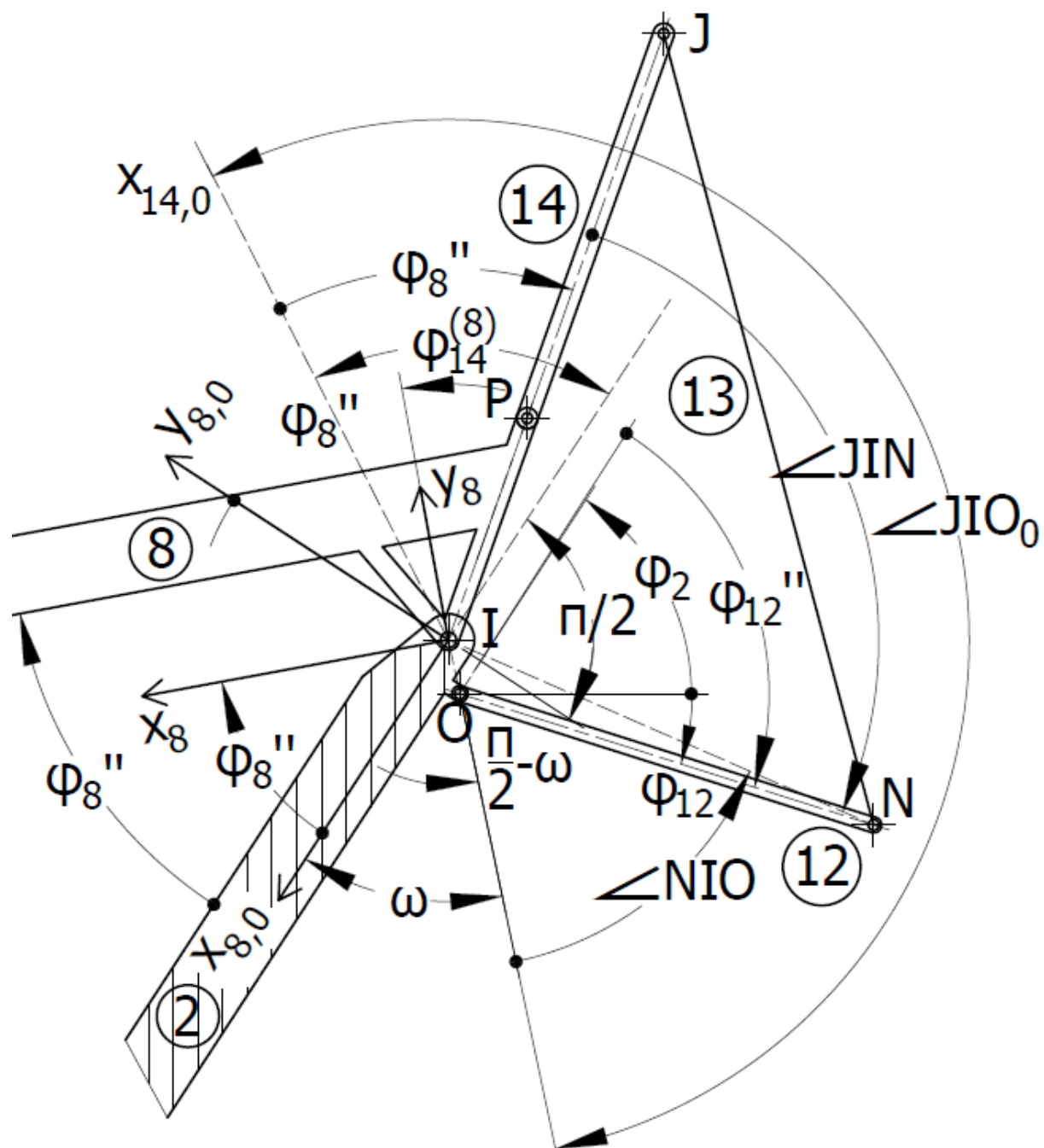
$$\varphi_{9+11,3} = \varphi_{KO} + \angle NKO_3; \varphi_{12,3} = \varphi_{KO} - \angle KNO_3$$

$$x_{L,3} = x_K - KL_3 \cdot \cos \varphi_{9+11,3}; y_{L,3} = y_K + KL_3 \cdot \sin \varphi_{9+11,3}$$

$$LM_{x,3} = x_{L,3} - x_M; LM_{y,3} = y_{L,3} - y_M; LM_3 = \sqrt{LM_{x,3}^2 + LM_{y,3}^2}$$

$$LM_3 \leq L_{10}; LM_3 - L_{10} \leq 0; \Delta LM_3 = LM_3 - L_{10}; \Delta LM_3 \leq 0$$

3.3.5.6 Kinematika čtyřkloubového mechanismu zvedání výložníku jeřábu



Obr.40: Schéma čtyřkloubového mechanismu zdvihu výložníku z horního dílu sloupu

$$\varphi_{12,1}; \varphi_{12,2}; \varphi_{12,3} \rightarrow \varphi_{12}; \varphi_{12}'' = \varphi_2 + \varphi_{12}$$

$$IN^2 = IO^2 + NO^2 - 2 \cdot IO \cdot NO \cdot \cos(\varphi''_{12} + \omega)$$

$$IN = \sqrt{IO^2 + NO^2 - 2 \cdot IO \cdot NO \cdot \cos(\varphi''_{12} + \omega)}$$

$$NO^2 = IN^2 + IO^2 - 2IN \cdot IO \cdot \cos \angle NIO \rightarrow \angle NIO = \cos^{-1} \frac{IN^2 + IO^2 - NO^2}{2 \cdot IN \cdot IO}$$

$$IO^2 = IN^2 + NO^2 - 2INNO \cdot \cos \angle INO \rightarrow \angle INO = \cos^{-1} \frac{IN^2 + NO^2 - IO^2}{2 \cdot IN \cdot NO}$$

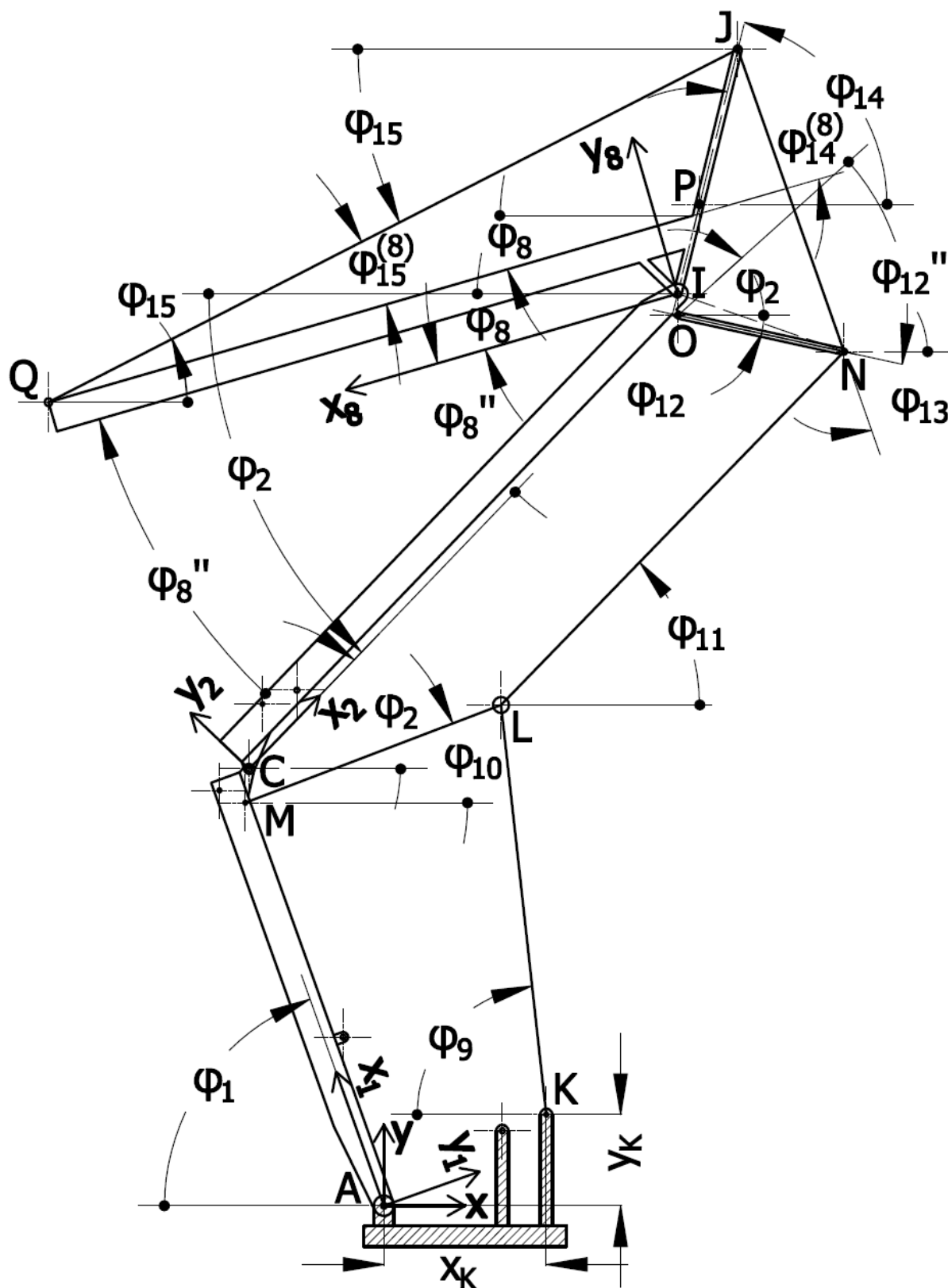
$$JN^2 = IJ^2 + IN^2 - 2 \cdot IJ \cdot IN \cdot \cos \angle JIN \rightarrow \angle JIN = \cos^{-1} \frac{IJ^2 + IN^2 - JN^2}{2 \cdot IJ \cdot IN}$$

$$IN^2 = IJ^2 + JN^2 - 2 \cdot IJ \cdot JN \cdot \cos \angle IJN \rightarrow \angle IJN = \cos^{-1} \frac{IJ^2 + JN^2 - IN^2}{2 \cdot IJ \cdot JN}$$

$$IJ^2 = IN^2 + JN^2 - 2 \cdot IN \cdot JN \cdot \cos \angle INJ \rightarrow \angle INJ = \cos^{-1} \frac{IN^2 + JN^2 - IJ^2}{2 \cdot IN \cdot JN}$$

$$\phi_8'' = \angle JIO_0 - \angle NIO - \angle JIN$$

3.3.5.7 Odvození vztahů pro určení průběhů funkcí úhlů sklonu výložníku a vzpěr a lan (proti)výložníku a lan natačení vzpěry protivýložníku jeřábu vůči rámu



Obr.41: Schéma určení úhlů sklonu výložníku a vzpěr a lan (proti)výložníku jeřábu vůči rámu

$$\varphi_8 = \varphi_2 - \varphi_8''; \varphi_8'' = \angle JIO_0 - \angle NIO - \angle JIN \rightarrow \varphi_8 = \varphi_2 - \angle JIO_0 - \angle NIO - \angle JIN$$

$$\varphi_{10+11,1} = \varphi_{MO} - \angle NMO_1$$

$$\varphi_{9,2} = \varphi_{KM} + \angle LKM_2$$

$$\varphi_{10,2} = \angle KML_2 - \varphi_{KM}$$

$$\varphi_{11,2} = \varphi_{LO,2} - \angle NLO_2$$

$$\varphi_{9+11,3} = \varphi_{KO} + \angle NKO_3$$

$$\varphi_{12,0} = \varphi_{12,0}'' - \varphi_2; \varphi_{12,0}'' = \angle JON_0 - \angle IOJ_0 - \omega \rightarrow \varphi_{12,0} = \angle JON_0 - \angle IOJ_0 - \omega - \varphi_2$$

$$\varphi_{12,1} = \pi - \varphi_{MO} - \angle MON_1$$

$$\varphi_{12,2} = \pi - \varphi_{LO,2} - \angle LON_2$$

$$\varphi_{12,3} = \varphi_{KO} - \angle KON_3$$

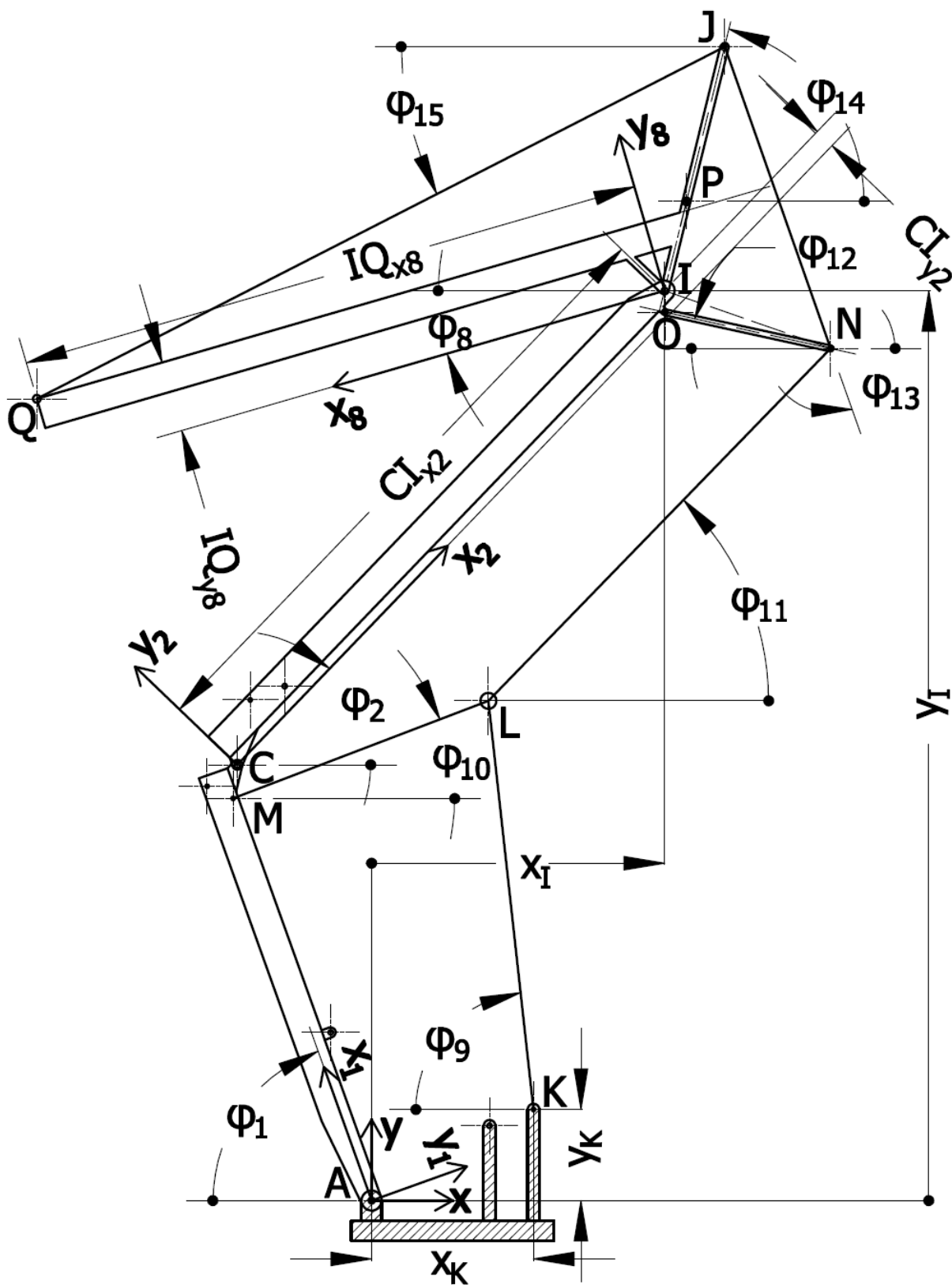
$$\varphi_{13} = \varphi_{12} + \angle INO + \angle INJ$$

$$\varphi_{14} = \varphi_8 + \varphi_{14}^{(8)} = \varphi_8 + \beta = \varphi_8 + \frac{\pi}{2} - \frac{\iota}{2} = \varphi_8 + 90^\circ - \frac{\iota}{2} = \varphi_8 + \psi$$

$$\varphi_{14} = \varphi_8 + 60^\circ = \varphi_8 + 90^\circ - \frac{60^\circ}{2} = \varphi_8 + \frac{\pi}{3} = \varphi_8 + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{3 \cdot 2}$$

$$\varphi_{15} = \varphi_8 + \varphi_{15}^{(8)}; \varphi_{15}^{(8)} = \angle IQJ - \vartheta; \varphi_{15} = \varphi_8 + \angle IQJ - \vartheta$$

3.3.5.8 Odvození vztahů pro určení nebo přímé číselné stanovení globálních souřadnic zbývajících pevných kloubů submechanismu s počátkem GSS v kloubu A



Obr.42: Schéma k určení globálních souřadnic kloubů (lan a vzpěr) (proti)výložníku jeřábu

$$x_I = x_C + CI_{x_2} \cdot \cos \varphi_2 - CI_{y_2} \cdot \sin \varphi_2; y_I = y_C + CI_{x_2} \cdot \sin \varphi_2 + CI_{y_2} \cdot \cos \varphi_2$$

$$x_j = x_I + IJ \cdot \cos \varphi_{14} \rightarrow x_j = x_I + IJ \cdot \cos(\varphi_8 + 60) = x_I + IJ \cdot \cos\left(\varphi_8 + \frac{\pi}{3}\right)$$

$$y_j = y_I + IJ \cdot \sin \varphi_{14} \rightarrow y_j = x_I + IJ \cdot \sin(\varphi_8 + 60^\circ) = x_I + IJ \cdot \sin\left(\varphi_8 + \frac{\pi}{3}\right)$$

$$x_K = 1,6 \text{ m}; y_K = 0,9 \text{ m}$$

$$x_{L,1} = x_M + LM_1 \cdot \cos \varphi_{10+11,1}; y_{L,1} = y_M + LM_1 \cdot \sin \varphi_{10+11,1}$$

$$x_{L,2} = x_K - KL_2 \cdot \cos \varphi_{9,2} = x_M + LM_2 \cdot \cos \varphi_{10,2}$$

$$y_{L,2} = y_K + KL_2 \cdot \sin \varphi_{9,2} = y_M + LM_2 \cdot \sin \varphi_{10,2}$$

$$x_{L,3} = x_K - KL_3 \cdot \cos \varphi_{9+11,3}; y_{L,3} = y_K + KL_3 \cdot \sin \varphi_{9+11,3}$$

$$x_M = -AM_{x_1} \cdot \cos \varphi_1 + AM_{y_1} \cdot \sin \varphi_1; y_M = AM_{x_1} \cdot \sin \varphi_1 + AM_{y_1} \cdot \cos \varphi_1$$

$$x_O = x_C + CO_{x_2} \cdot \cos \varphi_2 - CO_{y_2} \cdot \sin \varphi_2; y_O = y_C + CO_{x_2} \cdot \sin \varphi_2 + CO_{y_2} \cdot \cos \varphi_2$$

$$x_N = x_O + NO \cdot \cos \varphi_{12}; y_N = x_O - NO \cdot \sin \varphi_{12}$$

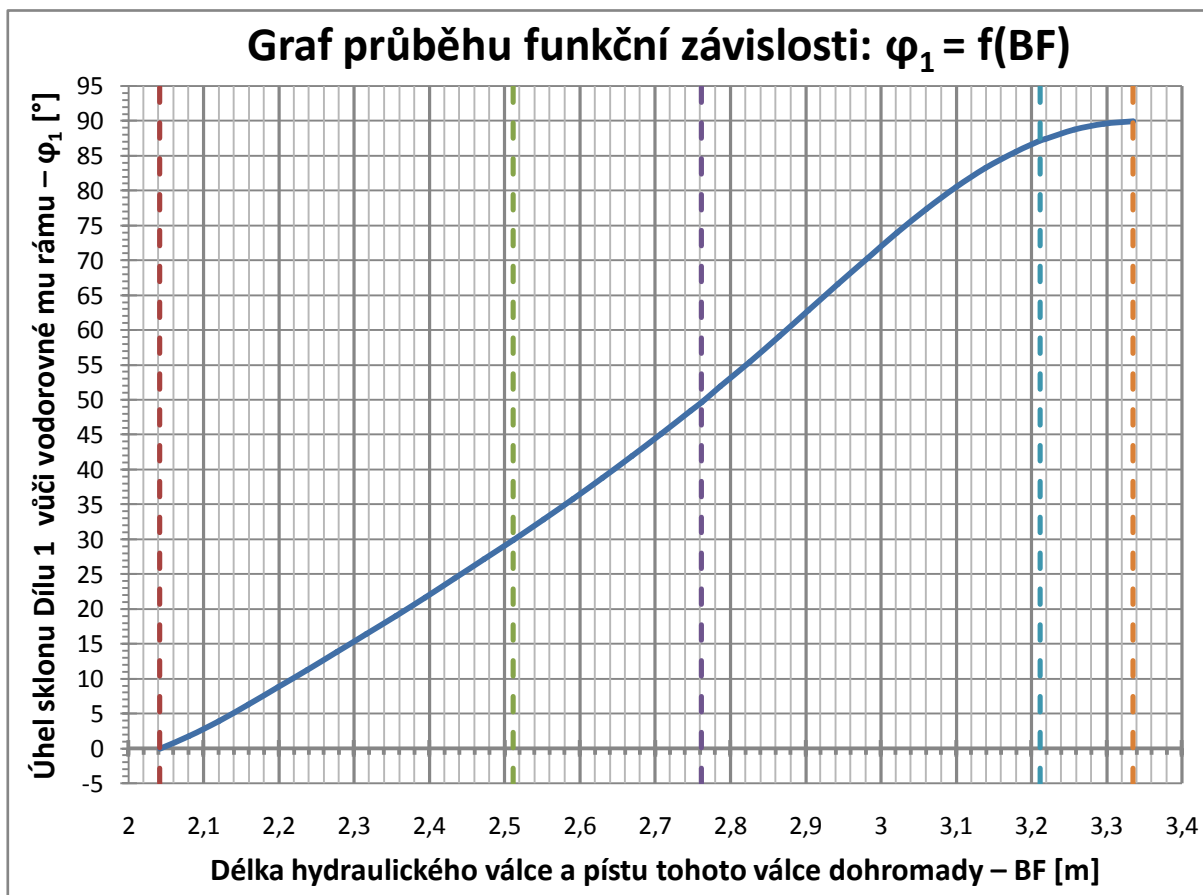
$$x_P = x_I + IP \cdot \cos \varphi_{14} \rightarrow x_P = x_I + IP \cdot \cos(\varphi_8 + 60^\circ) = x_I + IP \cdot \cos\left(\varphi_8 + \frac{\pi}{3}\right)$$

$$x_P = x_I + IP \cdot \cos \varphi_{14} \rightarrow x_P = x_I + IP \cdot \cos(\varphi_8 + 60^\circ) = x_I + IP \cdot \cos\left(\varphi_8 + \frac{\pi}{3}\right)$$

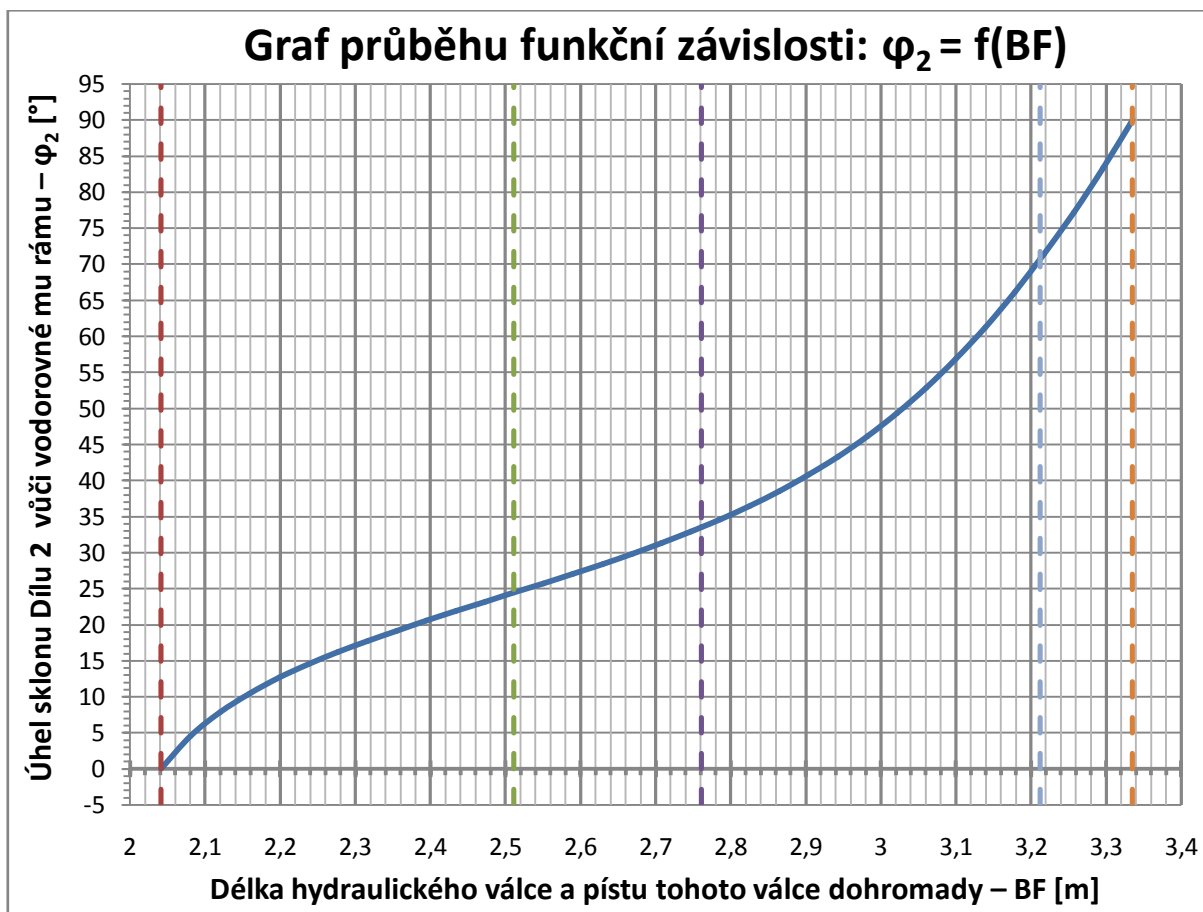
$$x_P = x_N - JN \cdot \cos \varphi_{13}; y_P = y_N + JN \cdot \sin \varphi_{13}$$

$$x_Q = x_I - IQ_{x_8} \cdot \cos \varphi_8 - IQ_{y_8} \cdot \sin \varphi_8; y_Q = y_I - IQ_{x_8} \cdot \sin \varphi_8 + IQ_{y_8} \cdot \cos \varphi_8$$

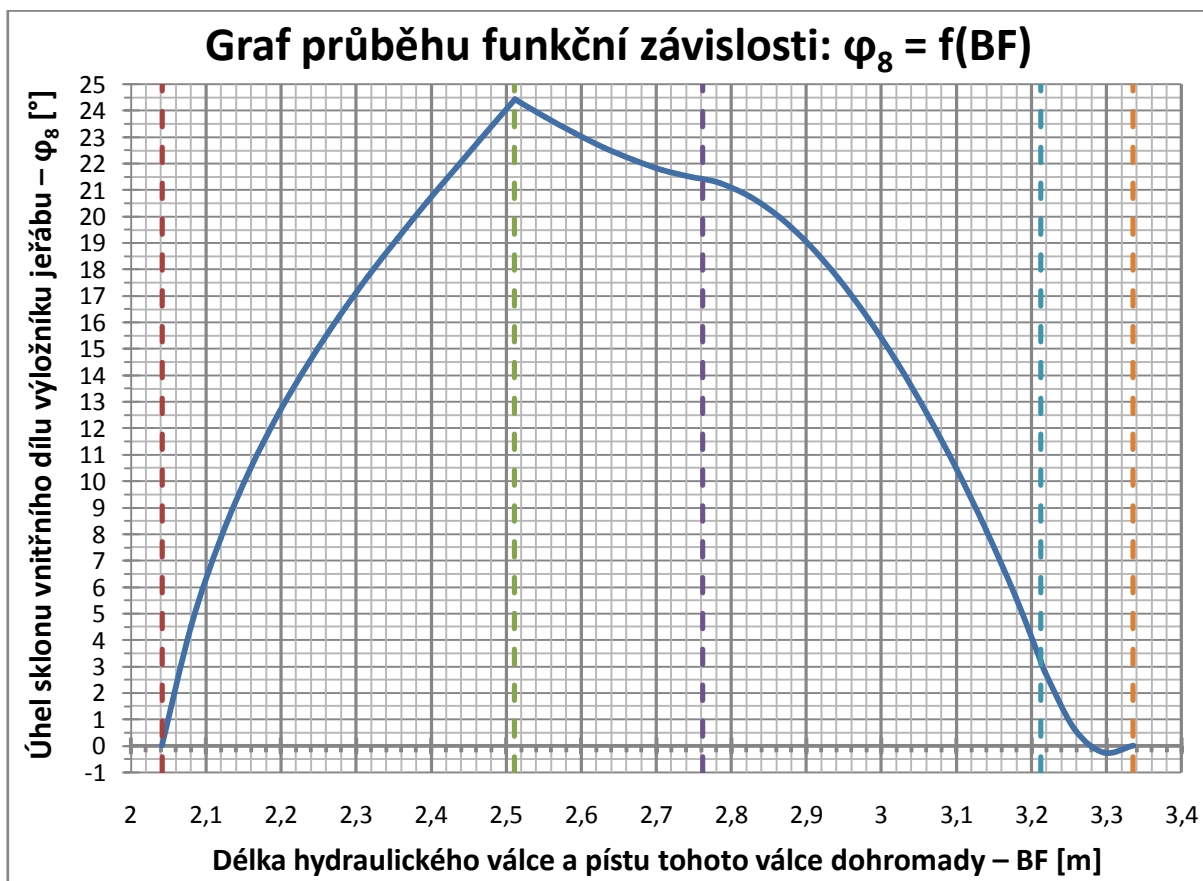
3.3.6 Grafy funkcí významných veličin polohy mechanismu zdvihu jeřábu



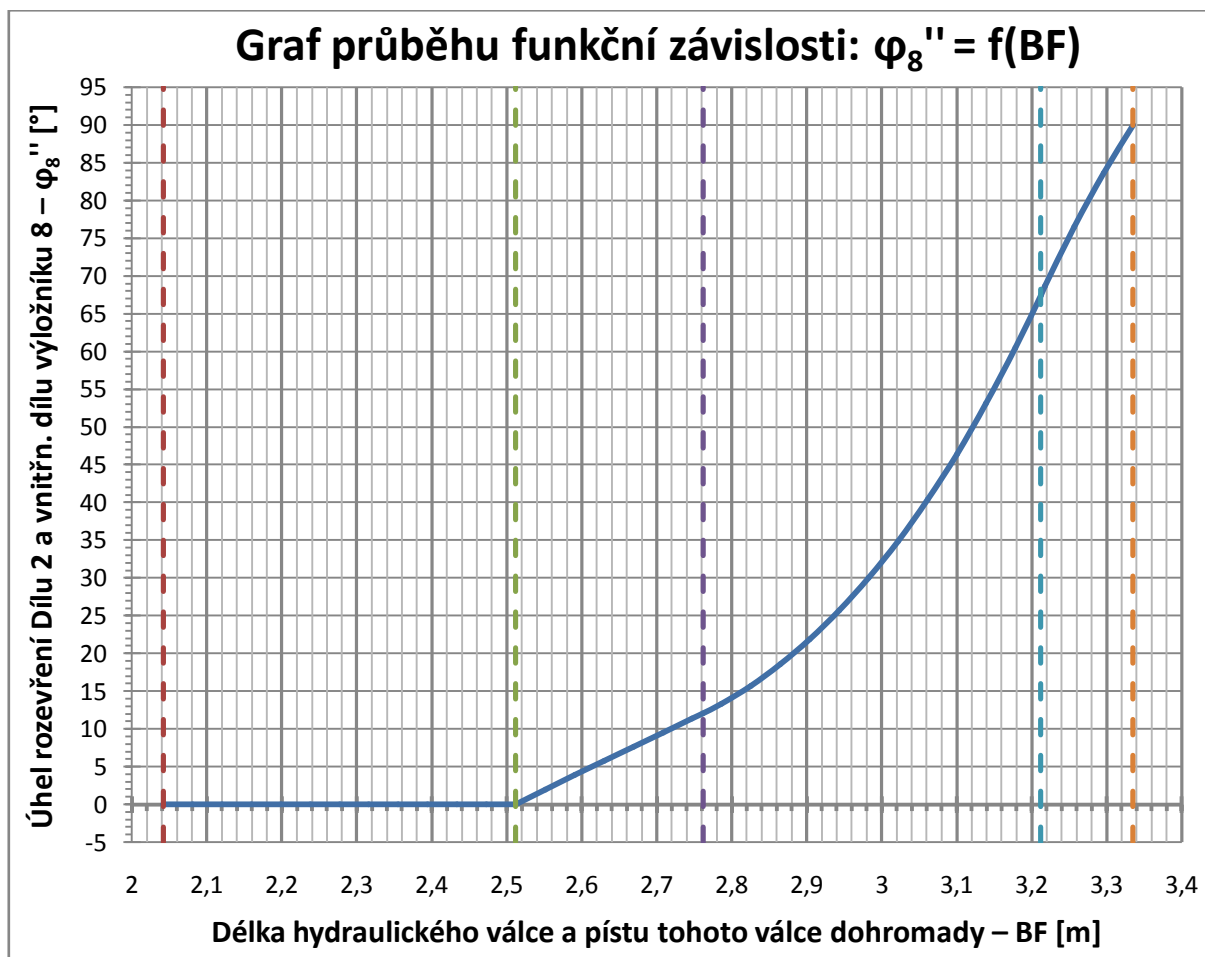
Obr.43: Graf funkce úhlu sklonu spodního dílu sloupu jeřábu vzhledem k vodorovnému rámu



Obr.44: Graf průběhu funkce úhlu sklonu horního dílu sloupu vůči vodorovnému rámu



Obr.45: Graf funkce úhlu sklonu výložníku jeřábu vůči vodorovnému nehybnému rámu



Obr.46: Graf funkce úhlu vzájemného rozevření horního dílu sloupu a výložníku jeřábu

3.3.7 Závislost natažení lan zdvihu výložníku na úhlu sklonu Dílu 1

$\varphi_1 [^\circ]$	Fáze procesu zvedání výložníku	Spodní lano zdvihání výložníku jeřábu do pracovní polohy – Lano 9	Pomocné lano zdvihání výložníku jeřábu do pracovní polohy – Lano 10	Horní lano zdvihání výložníku jeřábu do pracovní polohy – Lano 11
0	0. fáze (začátek procesu)	prověšené a tedy netáhne	prověšené a tedy netáhne	prověšené a tedy netáhne
5	0. fáze	prověšené a tedy netáhne	prověšené a tedy netáhne	prověšené a tedy netáhne
10	0. fáze	prověšené a tedy netáhne	prověšené a tedy netáhne	prověšené a tedy netáhne
15	0. fáze	prověšené a tedy netáhne	prověšené a tedy netáhne	prověšené a tedy netáhne
20	0. fáze	prověšené a tedy netáhne	prověšené a tedy netáhne	prověšené a tedy netáhne
25	0. fáze	prověšené a tedy netáhne	prověšené a tedy netáhne	prověšené a tedy netáhne
29,89	Přechod z 0. do 1. fáze zdvihání	prověšené a tedy netáhne	nataženo a srovnáno do jedné přímky a začíná se 11 tvořit a táhnout jako metalano zdvihu 10 + 11	nataženo a srovnáno do jedné přímky a začíná se 10 tvořit a táhnout jako metalano zdvihu 10 + 11
30	1. fáze	prověšené a tedy netáhne	s lanem 11 tvoří metalano zdvihu 10 + 11, jež táhne	s lanem 10 tvoří metalano zdvihu 10 + 11, jež táhne
35	1. fáze	prověšené a tedy netáhne	s lanem 11 tvoří metalano zdvihu 10 + 11, jež táhne	s lanem 10 tvoří metalano zdvihu 10 + 11, jež táhne

40	1. fáze	prověřené a tedy netáhne	s lanem 11 tvoří metalano zdvihu 10 + 11, jež táhne	s lanem 10 tvoří metalano zdvihu 10 + 11, jež táhne
45	1. fáze	prověřené a tedy netáhne	s lanem 11 tvoří metalano zdvihu 10 + 11, jež táhne	s lanem 10 tvoří metalano zdvihu 10 + 11, jež táhne
49,69	Přechod z 1. do 2. fáze zdvihání	právě plně nataženo a začíná nyní táhnout jako samostatné spodní lano zdvihu výložníku jeřábu 9	přestává tvořit metalano 10 + 11 a ležet v 1 přímce s lanem 11 a začíná nyní táhnout jako samostatné pomocné lano zdvihu 10	přestává tvořit metalano 10 + 11 a ležet v 1 přímce s lanem 10 a začíná nyní táhnout jako samostatné horní lano zdvihu 10
50	2. fáze	táhne jako samostatné spodní lano zdvihu 9	táhne jako samostatné pomocné lano zdvihu 10	táhne jako samostatné horní lano zdvihu 11
55	2. fáze	táhne jako samostatné spodní lano zdvihu 9	táhne jako samostatné pomocné lano zdvihu 10	táhne jako samostatné horní lano zdvihu 11
60	2. fáze	táhne jako samostatné spodní lano zdvihu 9	táhne jako samostatné pomocné lano zdvihu 10	táhne jako samostatné horní lano zdvihu 11
65	2. fáze	táhne jako samostatné spodní lano zdvihu 9	táhne jako samostatné pomocné lano zdvihu 10	táhne jako samostatné horní lano zdvihu 11
70	2. fáze	táhne jako samostatné spodní lano zdvihu 9	táhne jako samostatné pomocné lano zdvihu 10	táhne jako samostatné horní lano zdvihu 11
75	2. fáze	táhne jako samostatné spodní lano zdvihu 9	táhne jako samostatné pomocné lano zdvihu 10	táhne jako samostatné horní lano zdvihu 11
80	2. fáze	táhne jako samostatné spodní lano zdvihu 9	táhne jako samostatné pomocné lano zdvihu 10	táhne jako samostatné horní lano zdvihu 11
85	2. fáze	táhne jako samostatné spodní lano zdvihu 9	táhne jako samostatné pomocné lano zdvihu 10	táhne jako samostatné horní lano zdvihu 11
87,2	Přechod z 2. do 3. fáze zdvihání	srovnáno do přímky s 11, začíná s lanem 11 tvořit a táhnout s lanem 11 jako metalano zdvihu 9 + 11	začíná se prověřovat a přestává táhnout	srovnáno do přímky s 11, začíná s lanem 11 tvořit a táhnout s lanem 11 jako metalano zdvihu 9 + 11
88,5	3. fáze	s lanem 11 tvoří metalano zdvihu 9 + 11, jež táhne	prověřené a tedy netáhne	s lanem 9 tvoří metalano zdvihu 9 + 11, jež táhne
90	3. fáze (konec procesu)	s lanem 11 tvoří metalano zdvihu 9 + 11, jež táhne	prověřené a tedy netáhne	s lanem 9 tvoří metalano zdvihu 9 + 11, jež táhne

Tab. 1: Tabulka udávající stav natažení lan v závislosti na úhlu sklonu spodního dílu sloupu

4.1.1 Strukturální analýza čtyřkloubového přímovodu jeřábu ABCDEF

$$i = 3 \cdot (n - 1) - 2 \cdot (k + p + v) - j$$

$$i = 3 \cdot (4 - 1) - 2 \cdot (4 + 0 + 0) - 0 = 1$$

4.1.2 Kinematická analýza 4-klobového mechanismu jeřábu ABCD(EF)

$$AD = \sqrt{AD_x^2 + AD_y^2}; \delta = \tan^{-1}\left(\frac{AD_y}{AD_x}\right)$$

$$BD^2 = AD^2 + AB^2 - 2 \cdot AD \cdot AB \cdot \cos(\pi - \varphi_1 - \delta)$$

$$BD = \sqrt{AD^2 + AB^2 + 2 \cdot AD \cdot AB \cdot \cos(\varphi_1 + \delta)}$$

$$AB^2 = AD^2 + BD^2 - 2ADBD \cos \angle ADB \rightarrow \angle ADB = \cos^{-1} \frac{AD^2 + BD^2 - AB^2}{2 \cdot AD \cdot BD}$$

$$\varphi_B = \angle ADB - \delta$$

$$BD^2 = BC^2 + CD^2 - 2BCCD \cos \angle BCD \rightarrow \angle BCD = \cos^{-1} \frac{BC^2 + CD^2 - BD^2}{2 \cdot BC \cdot CD}$$

$$BC^2 = BD^2 + CD^2 - 2BCCD \cos \angle BDC \rightarrow \angle BDC = \cos^{-1} \frac{BD^2 + CD^2 - BC^2}{2 \cdot BD \cdot CD}$$

$$CD^2 = BC^2 + BD^2 - 2BCBD \cos \angle CBD \rightarrow \angle CBD = \cos^{-1} \frac{BD^2 + BC^2 - CD^2}{2 \cdot BD \cdot BC}$$

$$\varphi_2 = \angle CBD - \varphi_B; \varphi_3 = \varphi_B + \angle BDC$$

$$-AB \cdot \cos \varphi_1 + BC \cdot \cos \varphi_2 + CD \cdot \cos \varphi_3 = AD_x$$

$$AB \cdot \sin \varphi_1 + BC \cdot \sin \varphi_2 - CD \cdot \sin \varphi_3 = AD_y$$

$$x_A = y_A = 0 \text{ m}; x_B = -AB \cdot \cos \varphi_1; y_B = AB \cdot \sin \varphi_1$$

$$x_D = AD_x; y_D = AD_y$$

$$x_C = x_B + BC \cdot \cos \varphi_2 = x_D - CD \cdot \cos \varphi_3$$

$$y_C = y_B + BC \cdot \sin \varphi_2 = y_D + CD \cdot \sin \varphi_3$$

$$x_E = x_B - CE \cdot \cos \varphi_2; y_E = y_B - CE \cdot \sin \varphi_2$$

$$x_F = x_C - CF_{x_2} \cos \varphi_2 - CF_{y_2} \cdot \sin \varphi_2; y_F = y_C - CF_{x_2} \cdot \sin \varphi_2 + CF_{y_2} \cos \varphi_2$$

4.2 Rozměrová syntéza čtyřkloubového přímovodu ABCD(EF) jeřábu

4.2.1 Obecný teoretický úvod, podstata, principy a matematické pozadí týkající se optimalizačních metod řešení rozměrové syntézy mechanismů obecně

$$\mathbf{p} = \{p_1 \ p_2 \ \cdots \ p_i \ \cdots \ p_j \ \cdots \ p_n\}^T; F(\mathbf{p}) = F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)$$

$$\mathbf{p}^* = \{p_1^* \ p_2^* \ p_3^* \ \cdots \ p_i^* \ \cdots \ p_j^* \ \cdots \ p_n^*\}^T; F(\mathbf{p}^*) = \min F(\mathbf{p})$$

$$F(p_1^*, p_2^*, p_3^*, \dots, p_i^*, \dots, p_j^*, \dots, p_n^*) = \min F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)$$

Přičemž vždy: $n \geq 2$; $i < j$; $i = 1, 2, 3, \dots, j - 1$; $j = i + 1, i + 2, i + 3, \dots, n$

$$g_i(\mathbf{p}) = g_i(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_r) \leq 0, \text{ přičemž: } i = 1, 2, 3, \dots, r$$

$$h_j(\mathbf{p}) = h_j(p_1, p_2, p_3, \dots, p_j, \dots, p_s) = 0, \text{ přičemž: } j = 1, 2, 3, \dots, s$$

$$\nabla = \left\{ \frac{\partial}{\partial p_1} \ \frac{\partial}{\partial p_2} \ \frac{\partial}{\partial p_3} \ \cdots \ \frac{\partial}{\partial p_i} \ \cdots \ \frac{\partial}{\partial p_j} \ \cdots \ \frac{\partial}{\partial p_n} \right\}^T$$

$$\nabla F(\mathbf{p}) = [\nabla F(\mathbf{p})] = \nabla \cdot F(\mathbf{p}) = \left\{ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1} \ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_2} \ \cdots \ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i} \ \cdots \ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j} \ \cdots \ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_n} \right\}^T$$

$$\nabla F(\mathbf{p}) = \left\{ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1} \ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_2} \ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_3} \ \cdots \ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i} \ \cdots \ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j} \ \cdots \ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_n} \right\}^T = 0$$

$$\nabla F(\mathbf{p}) = 0 = \mathbf{o} = [0 \ 0 \ 0 \ \cdots \ 0 \ \cdots \ 0 \ \cdots \ 0]^T$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1} = \frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)}{\partial p_1} = 0$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_2} = \frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)}{\partial p_2} = 0$$

⋮

$$\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i} = \frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)}{\partial p_i} = 0$$

⋮

$$\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j} = \frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)}{\partial p_j} = 0$$

$$\vdots$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_n} = \frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)}{\partial p_n} = 0$$

$$\nabla F(\mathbf{p}^*) = \left\{ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1}(\mathbf{p}^*) \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_2}(\mathbf{p}^*) \quad \dots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^*) \quad \dots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j}(\mathbf{p}^*) \quad \dots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_n}(\mathbf{p}^*) \right\}^T$$

$$\nabla F(\mathbf{p}^*) = \left\{ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1}(\mathbf{p}^*) \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_2}(\mathbf{p}^*) \quad \dots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^*) \quad \dots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j}(\mathbf{p}^*) \quad \dots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_n}(\mathbf{p}^*) \right\}^T = 0$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1}(\mathbf{p}^*) = \frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)}{\partial p_1}(p_1^*, p_2^*, p_3^*, \dots, p_i^*, \dots, p_j^*, \dots, p_n^*) = 0$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_2}(\mathbf{p}^*) = \frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)}{\partial p_2}(p_1^*, p_2^*, p_3^*, \dots, p_i^*, \dots, p_j^*, \dots, p_n^*) = 0$$

$$\vdots$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^*) = \frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)}{\partial p_i}(p_1^*, p_2^*, p_3^*, \dots, p_i^*, \dots, p_j^*, \dots, p_n^*) = 0$$

$$\vdots$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j}(\mathbf{p}^*) = \frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)}{\partial p_j}(p_1^*, p_2^*, p_3^*, \dots, p_i^*, \dots, p_j^*, \dots, p_n^*) = 0$$

$$\vdots$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_n}(\mathbf{p}^*) = \frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)}{\partial p_j}(p_1^*, p_2^*, p_3^*, \dots, p_i^*, \dots, p_j^*, \dots, p_n^*) = 0$$

$$\nabla^2 F(\mathbf{p}) = \nabla^2 F(\mathbf{p}) = \nabla \cdot \nabla F(\mathbf{p})^T$$

$$\nabla^2 F(\mathbf{p})$$

$$= \left\{ \nabla \cdot \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1} \quad \nabla \cdot \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_2} \quad \dots \quad \nabla \cdot \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i} \quad \dots \quad \nabla \cdot \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j} \quad \dots \quad \nabla \cdot \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j} \right\}^T$$

$$\nabla^2 F(\mathbf{p}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_1 \partial p_1} & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_1 \partial p_2} & \cdots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_1 \partial p_i} & \cdots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_1 \partial p_j} & \cdots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_1 \partial p_n} \\ \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_2 \partial p_1} & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_2 \partial p_2} & \cdots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_2 \partial p_i} & \cdots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_2 \partial p_j} & \cdots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_2 \partial p_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_1} & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_2} & \cdots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_i} & \cdots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_j} & \cdots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_1} & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_2} & \vdots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_i} & \cdots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_j} & \cdots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_n \partial p_1} & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_n \partial p_2} & \cdots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_n \partial p_i} & \cdots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_n \partial p_j} & \cdots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_n \partial p_n} \end{pmatrix}$$

81

$$\nabla^2 F(\mathbf{p}^*) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_1^2}(\mathbf{p}^*) & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_1 \partial p_2}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_1 \partial p_i}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_1 \partial p_j}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_1 \partial p_n}(\mathbf{p}^*) \\ \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_2 \partial p_1}(\mathbf{p}^*) & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_2^2}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_2 \partial p_i}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_2 \partial p_j}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_2 \partial p_n}(\mathbf{p}^*) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_1}(\mathbf{p}^*) & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_2}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i^2}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_j}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_n}(\mathbf{p}^*) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_1}(\mathbf{p}^*) & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_2}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_i}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j^2}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_n}(\mathbf{p}^*) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_n \partial p_1}(\mathbf{p}^*) & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_n \partial p_2}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_n \partial p_i}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_n \partial p_j}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_n^2}(\mathbf{p}^*) \end{pmatrix}$$

$$\det \nabla^2 F(\mathbf{p}^*) = |\nabla^2 F(\mathbf{p}^*)| > 0$$

$$|\nabla^2 F(\mathbf{p}^*)| = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_1^2}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_1 \partial p_i}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_1 \partial p_j}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_1 \partial p_n}(\mathbf{p}^*) \\ \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_2 \partial p_1}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_2 \partial p_i}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_2 \partial p_j}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_2 \partial p_n}(\mathbf{p}^*) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_1}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i^2}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_j}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_n}(\mathbf{p}^*) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_1}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_i}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j^2}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_n}(\mathbf{p}^*) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_n \partial p_1}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_n \partial p_i}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_n \partial p_j}(\mathbf{p}^*) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_n^2}(\mathbf{p}^*) \end{vmatrix} > 0$$

4.2.2 Stanovení vektoru rozměrových parametrů 4-kloubového přímovodu ABCD(EF) přístavního jeřábu proměnných v rámci jeho rozměrové optimalizace

$$p_1 = AD_x; p_2 = AD_y; p_3 = AB; p_4 = BC; p_5 = CD; p_6 = BE$$

$$\mathbf{p} = \{p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_5 \ p_6\}^T = \{AD_x \ AD_y \ AB \ BC \ CD \ BE\}^T$$

4.2.3 Definice použité cílové funkce při optimalizaci přímovodu ABCD(EF)

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_i - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}}$$

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_i + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2} = \sqrt{\frac{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 + \dots + \Delta x_i^2 + \dots + \Delta x_n^2}{n-1}}$$

$$s_{y_E}(\mathbf{p}) = \sqrt{\frac{1}{m-1} \cdot \sum_{l=1}^m (y_{E_l}(\mathbf{p}) - \overline{y_E}(\mathbf{p}))^2}$$

$$s_{y_E}(AD_x, AD_y, AB, BC, CD, BE) = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{l=1}^m (y_{E_l}(AD_x, AD_y, AB, BC, CD, BE) - \overline{y_E}(AD_x, AD_y, AB, BC, CD, BE))^2}$$

$$s_{y_E} = \sqrt{\frac{(y_{E_1}(\mathbf{p}) - \overline{y_E}(\mathbf{p}))^2 + (y_{E_2}(\mathbf{p}) - \overline{y_E}(\mathbf{p}))^2 + \dots + (y_{E_l}(\mathbf{p}) - \overline{y_E}(\mathbf{p}))^2 + \dots + (y_{E_m}(\mathbf{p}) - \overline{y_E}(\mathbf{p}))^2}{m-1}}$$

$$\Delta y_{E_l} = y_{E_l} - \overline{y_E}$$

$$s_{y_E}(\mathbf{p}) = s_{y_E}(AD_x, AD_y, AB, BC, CD, BE) = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{l=1}^m \Delta y_{E_l}^2(\mathbf{p})} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{l=1}^m \Delta y_{E_l}^2(AD_x, AD_y, AB, BC, CD, BE)}$$

$$s_{y_E} = \sqrt{\frac{\Delta y_{E_1}^2(\mathbf{p}) + \Delta y_{E_2}^2(\mathbf{p}) + \Delta y_{E_3}^2(\mathbf{p}) + \dots + \Delta y_{E_l}^2(\mathbf{p}) + \dots + \Delta y_{E_m}^2(\mathbf{p})}{m-1}}$$

$$s_{y_E} = \sqrt{\frac{\Delta y_{E_1}^2(AD_x, AD_y, AB, BC, CD, BE) + \Delta y_{E_2}^2(AD_x, AD_y, AB, BC, CD, BE) + \dots + \Delta y_{E_m}^2(AD_x, AD_y, AB, BC, CD, BE)}{m-1}}$$

4.2.4 Počáteční odhad vektoru rozměrů 4-klobového přímovodu ABCD(EF)

vstupující do procesu syntézy mechanismu rozměrovou optimalizací

přístavního portálového jeřábu se úhlově stavitelným členěným výložníkem se trojúhelníkovou těhlicí BCEF se převislým koncem BE strany CE $\triangle CEF$ vstupujícího do procesu rozměrové syntézy mechanismu optimalizací hodnot rozměrů a hodnota cílové funkce úlohy optimalizace mechanismu pro počáteční odhad vektoru rozměrů

Vstupní parametry mechanismu: $p_1^0 = AD_x^0 = 1,4 \text{ m}$; $p_2^0 = AD_y^0 = 5,3 \text{ m}$

$p_3^0 = AB^0 = 13,1 \text{ m}$; $p_4^0 = BC^0 = 4,1 \text{ m}$; $p_5^0 = CD^0 = 10,1 \text{ m}$; $p_6^0 = BE^0 = 4,1 \text{ m}$

$$\mathbf{p}^0 = \{AD_x^0 \quad AD_y^0 \quad AB^0 \quad BC^0 \quad CD^0 \quad BE^0\}^T$$

$$\mathbf{p}^0 = \{1,4 \text{ m} \quad 5,3 \text{ m} \quad 13,1 \text{ m} \quad 4,1 \text{ m} \quad 10,1 \text{ m} \quad 4,1 \text{ m}\}^T$$

$$AD = \sqrt{AD_x^2 + AD_y^2} \rightarrow AD = (\sqrt{4^2 + 2^2}) \text{ m} \doteq 4,472 \text{ m}$$

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{AD_y}{AD_x}\right) \rightarrow \delta = \tan^{-1}\left(\frac{2}{4}\right) \doteq 0,4636 \text{ (rad)} \cong 26,565^\circ$$

$$x_A = y_A = 0 \text{ m}; x_D = AD_x = 4 \text{ m}; y_D = AD_y = 2 \text{ m}$$

Hodnota cílové funkce pro vstupní parametry:

$$F(\mathbf{p}^0) = s_{y_E}(\mathbf{p}^0) = s_{y_E}(AD_x^0, AD_y^0, AB^0, BC^0, CD^0, BE^0)$$

$$F(\mathbf{p}^0) = s_{y_E}(\mathbf{p}^0) = s_{y_E}(1,4 \text{ m}, 5,3 \text{ m}, 13,1 \text{ m}, 4,1 \text{ m}, 10,1 \text{ m}, 4,1 \text{ m}) = 0,112578 \text{ m}$$

4.2.5 Metoda největší citlivosti cíl. funkce při změně 1 jejího parametru

hodnoty cílové funkce úlohy rozměrové optimalizace mechanismu na (velmi) malé změny hodnoty jednotlivých rozměrů

na (velmi) malé změny hodnoty jednotlivých rozměrových parametrů mechanismu jako jednotlivých nezávisle proměnných veličin cílové funkce při příslušném vektoru ve daném

roku procesu optimalizace velikostí rozměrových parametrů mechanismu okamžitých hodnotách všech rozměrových parametrů mechanismu

4.2.5.1 Teoretický úvod, podstata, princip a matematické pozadí optimalizační metody největší citlivosti funkční hodnoty cílové funkce na změnu parametru funkce

funkční hodnoty skalární cílové funkce optimalizační úlohy rozměrové syntézy mechanismů na (velmi) malou změnu hodnoty pouze jednoho ze (nezávisle) proměnných rozměrových parametrů mechanismu prostřednictvím rovnic vyjádřené

$$C_{p_i} = \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i} = \frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_n)}{\partial p_i}$$

Pro: $k = 0, 1, \dots$

$$\mathbf{p}^k = \{p_1^k \quad p_2^k \quad p_3^k \quad \dots \quad p_i^k \quad \dots \quad p_n^k\}^T$$

$$F(\mathbf{p}^k) = F(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_n^k)$$

$$C_{p_i}(\mathbf{p}^k) = \frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_n)}{\partial p_i}(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k, \dots, p_n^k)$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \cong \frac{F(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k + \Delta p_i, \dots, p_n^k) - F(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k, \dots, p_n^k)}{\Delta p_i}$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \cong \frac{F(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k + \Delta p_i, \dots, p_n^k) - F(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k - \Delta p_i, \dots, p_n^k)}{2 \cdot \Delta p_i}$$

$$C_{p_i}(\mathbf{p}^k) = \frac{F(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k + \Delta p_i, \dots, p_n^k) - F(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k, \dots, p_n^k)}{\Delta p_i}$$

$$C_{p_i}(\mathbf{p}^k) = \frac{F(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k + \Delta p_i, \dots, p_n^k) - F(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k - \Delta p_i, \dots, p_n^k)}{2 \cdot \Delta p_i}$$

$$C_{p_{i_{\max}}}(\mathbf{p}^k) = \max_{i=1,2,3,\dots,i,\dots,n} |C_{p_i}(\mathbf{p}^k)|$$

$$C_{p_{i_{\max}}}(\mathbf{p}^k) = \max_{i=1,2,3,\dots,i,\dots,n} \left| \frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_n)}{\partial p_i}(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k, \dots, p_n^k) \right|$$

$$C_{p_{i_{max}}}(\mathbf{p}^k) = \max_{i=1,2,3,\dots,i,\dots,n} \left| \frac{F(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k + \Delta p_i, \dots, p_n^k) - F(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k, \dots, p_n^k)}{\Delta p_i} \right|$$

$$C_{p_{i_{max}}}(\mathbf{p}^k) = \max_{i=1,2,3,\dots,i,\dots,n} \left| \frac{F(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k + \Delta p_i, \dots, p_n^k) - F(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k - \Delta p_i, \dots, p_n^k)}{2 \cdot \Delta p_i} \right|$$

$$\mathbf{p}^{k+1} = \{p_1^{k+1} \quad p_2^{k+1} \quad p_3^{k+1} \quad \dots \quad p_i^{k+1} \quad \dots \quad p_n^{k+1}\}^T$$

$$F(\mathbf{p}^{k+1}) = F(p_1^{k+1}, p_2^{k+1}, p_3^{k+1}, \dots, p_i^{k+1}, \dots, p_n^{k+1})$$

V případě, že je splněna podmínka: $C_{p_i}(\mathbf{p}^k) = C_{p_{i_{max}}}(\mathbf{p}^k) = \max_{i=1,2,3,\dots,i,\dots,n} |C_{p_i}(\mathbf{p}^k)|$

$$\text{pak: } p_i^{k+1} = p_i^k - \mu$$

jinak, když platí: $C_{p_i}(\mathbf{p}^k) = -C_{p_{i_{max}}}(\mathbf{p}^k) = -\max_{i=1,2,3,\dots,i,\dots,n} |C_{p_i}(\mathbf{p}^k)|$, pak: $p_i^{k+1} = p_i^k + \mu$

jinak musí platit: $C_{p_i}(\mathbf{p}^k) \neq \mp C_{p_{i_{max}}}(\mathbf{p}^k) = \mp \max_{i=1,2,3,\dots,i,\dots,n} |C_{p_i}(\mathbf{p}^k)|$, a pak: $p_i^{k+1} = p_i^k$

Přičemž vždy: $n \geq 2; i = 1, 2, 3, \dots, n$

4.2.5.2 Aplikace metody největší citlivosti na zvolenou cílovou funkci úlohy rozměrové optimalizace čtyřkloubového přímovodu ABCD(EF) přístavního jeřábu

$$\mu = 0,05 \text{ m}$$

k [-]	AD _x ^k [m]	AD _y ^k [m]	AB ^k [m]	BC ^k [m]	CD ^k [m]	BE ^k [m]	s _{yE} ^k [m]
0	1,4	5,3	13,1	1,4	10,1	4,1	0,112578
1	1,4	5,3	13,1	1,45	10,1	4,1	0,109044
2	1,4	5,3	13,1	1,45	10,05	4,1	0,099775

⋮

k [-]	C _{ADx} ^k [-]	C _{ADy} ^k [-]	C _{AB} ^k [-]	C _{BC} ^k [-]	C _{CD} ^k [-]	C _{BE} ^k [-]	MIN(C _{pi} ^k)	MAX(C _{pi} ^k)
0	0,007107	0,120235	-0,05864	-0,26915	0,058194	0,005527	-0,26915	0,120235
1	-0,28035	0,202736	-0,28995	0,118011	0,331732	-0,07226	-0,28995	0,331732

2	0,008751	0,076101	-0,0229	-0,16889	0,024949	-0,00529	-0,16889	0,076101
---	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------

⋮

k [-]	AD_x^{k+1} [m]	AD_y^{k+1} [m]	AB^{k+1} [m]	BC^{k+1} [m]	CD^{k+1} [m]	BE^{k+1} [m]	s_{yE}^{k+1} [m]
0	1,4	5,3	13,1	1,45	10,1	4,1	0,109044
1	1,4	5,3	13,1	1,45	10,05	4,1	0,099775
2	1,4	5,3	13,1	1,5	10,05	4,1	0,102309

$$\mu = 0,025 \text{ m}$$

k [-]	AD_x^k [m]	AD_y^k [m]	AB^k [m]	BC^k [m]	CD^k [m]	BE^k [m]	s_{yE}^k [m]
2	1,4	5,3	13,1	1,45	10,05	4,1	0,099775
3	1,4	5,3	13,1	1,475	10,05	4,1	0,098409
4	1,4	5,3	13,1	1,475	10,025	4,1	0,095606

⋮

k [-]	C_{ADx}^k [-]	C_{ADy}^k [-]	C_{AB}^k [-]	C_{BC}^k [-]	C_{CD}^k [-]	C_{BE}^k [-]	MIN(C_{pi}^k)	MAX(C_{pi}^k)
2	0,008751	0,076101	-0,0229	-0,16889	0,024949	-0,00529	-0,16889	0,076101
3	-0,16113	0,125204	-0,15933	0,056455	0,186442	-0,05107	-0,16113	0,186442
4	-0,01368	0,067243	-0,02855	-0,10544	0,034914	-0,01515	-0,10544	0,067243

⋮

k [-]	AD_x^{k+1} [m]	AD_y^{k+1} [m]	AB^{k+1} [m]	BC^{k+1} [m]	CD^{k+1} [m]	BE^{k+1} [m]	s_{yE}^{k+1} [m]
2	1,4	5,3	13,1	1,475	10,05	4,1	0,098409
3	1,4	5,3	13,1	1,475	10,025	4,1	0,095606
4	1,4	5,3	13,1	1,500	10,025	4,1	0,095926

$$\mu = 0,02 \text{ m}$$

k [-]	AD_x^k [m]	AD_y^k [m]	AB^k [m]	BC^k [m]	CD^k [m]	BE^k [m]	s_{yE}^k [m]
4	1,4	5,3	13,1	1,475	10,025	4,1	0,095606
5	1,4	5,3	13,1	1,495	10,025	4,1	0,095405
6	1,4	5,3	13,1	1,495	10,005	4,1	0,093209
7	1,4	5,28	13,1	1,495	10,005	4,1	0,092112

⋮

k [-]	C_{ADx}^k [-]	C_{ADy}^k [-]	C_{AB}^k [-]	C_{BC}^k [-]	C_{CD}^k [-]	C_{BE}^k [-]	MIN(C_{pi}^k)	MAX(C_{pi}^k)
4	-0,01368	0,067243	-0,02855	-0,10544	0,034914	-0,01515	-0,10544	0,067243
5	-0,15334	0,105541	-0,13899	0,082362	0,166182	-0,05308	-0,15334	0,166182

6	-0,03978	0,063762	-0,04051	-0,04801	0,051482	-0,02479	-0,04801	0,063762
7	0,001151	0,046038	-0,00292	-0,09013	0,008256	-0,01516	-0,09013	0,046038

⋮

k [-]	AD _x ^{k+1} [m]	AD _y ^{k+1} [m]	AB ^{k+1} [m]	BC ^{k+1} [m]	CD ^{k+1} [m]	BE ^{k+1} [m]	s _{YE} ^{k+1} [m]
4	1,4	5,3	13,1	1,495	10,025	4,1	0,095405
5	1,4	5,3	13,1	1,495	10,005	4,1	0,093209
6	1,4	5,28	13,1	1,495	10,005	4,1	0,092112
7	1,4	5,28	13,1	1,515	10,005	4,1	0,092342

$$\mu = 0,01 \text{ m}$$

k [-]	AD _x ^k [m]	AD _y ^k [m]	AB ^k [m]	BC ^k [m]	CD ^k [m]	BE ^k [m]	s _{YE} ^k [m]
7	1,4	5,28	13,1	1,495	10,005	4,1	0,092112
8	1,4	5,28	13,1	1,505	10,005	4,1	0,091727
9	1,4	5,28	13,1	1,505	9,995	4,1	0,091225
10	1,4	5,28	13,1	1,515	9,995	4,1	0,091162
11	1,41	5,28	13,1	1,515	9,995	4,1	0,090542
12	1,41	5,27	13,1	1,515	9,995	4,1	0,090105

⋮

k [-]	C _{ADx} ^k [-]	C _{ADy} ^k [-]	C _{AB} ^k [-]	C _{BC} ^k [-]	C _{CD} ^k [-]	C _{BE} ^k [-]	MIN(C _{pi} ^k)	MAX(C _{pi} ^k)
7	0,001151	0,046038	-0,00292	-0,09013	0,008256	-0,01516	-0,09013	0,046038
8	-0,07461	0,066516	-0,06246	0,0124	0,07907	-0,03574	-0,07461	0,07907
9	-0,01599	0,046265	-0,01276	-0,05808	0,020943	-0,02085	-0,05808	0,046265
10	-0,09136	0,065981	-0,07148	0,044712	0,090944	-0,04138	-0,09136	0,090944
11	-0,03206	0,047605	-0,02295	-0,03033	0,033747	-0,02593	-0,03206	0,047605
12	-0,0131	0,039857	-0,0059	-0,05086	0,01405	-0,02137	-0,05086	0,039857

⋮

k [-]	AD _x ^{k+1} [m]	AD _y ^{k+1} [m]	AB ^{k+1} [m]	BC ^{k+1} [m]	CD ^{k+1} [m]	BE ^{k+1} [m]	s _{YE} ^{k+1} [m]
7	1,4	5,28	13,1	1,505	10,005	4,1	0,091727
8	1,4	5,28	13,1	1,505	9,995	4,1	0,091225
9	1,4	5,28	13,1	1,515	9,995	4,1	0,091162
10	1,41	5,28	13,1	1,515	9,995	4,1	0,090542
11	1,41	5,27	13,1	1,515	9,995	4,1	0,090105
12	1,41	5,27	13,1	1,525	9,995	4,1	0,090125

$$\mu = 0,005 \text{ m}$$

k [-]	AD _x ^k [m]	AD _y ^k [m]	AB ^k [m]	BC ^k [m]	CD ^k [m]	BE ^k [m]	s _{YE} ^k [m]
12	1,41	5,27	13,1	1,515	9,995	4,1	0,090105
13	1,41	5,27	13,1	1,52	9,995	4,1	0,089984
14	1,415	5,27	13,1	1,52	9,995	4,1	0,0898
15	1,415	5,265	13,1	1,52	9,995	4,1	0,089606
16	1,415	5,265	13,1	1,525	9,995	4,1	0,089506
17	1,42	5,265	13,1	1,525	9,995	4,1	0,089325
18	1,42	5,26	13,1	1,525	9,995	4,1	0,089144
19	1,42	5,26	13,1	1,53	9,995	4,1	0,089067
20	1,425	5,26	13,1	1,53	9,995	4,1	0,088886
21	1,425	5,255	13,1	1,53	9,995	4,1	0,088718
22	1,425	5,255	13,1	1,535	9,995	4,1	0,088666
23	1,43	5,255	13,1	1,535	9,995	4,1	0,088484
24	1,43	5,25	13,1	1,535	9,995	4,1	0,088327
25	1,43	5,25	13,1	1,54	9,995	4,1	0,088301
26	1,435	5,25	13,1	1,54	9,995	4,1	0,088116
27	1,435	5,245	13,1	1,54	9,995	4,1	0,08797
28	1,435	5,24	13,1	1,54	9,995	4,1	0,087841
29	1,435	5,24	13,1	1,545	9,995	4,1	0,087792
30	1,44	5,24	13,1	1,545	9,995	4,1	0,087646
31	1,44	5,235	13,1	1,545	9,995	4,1	0,087525
32	1,44	5,235	13,1	1,55	9,995	4,1	0,087506
33	1,445	5,235	13,1	1,55	9,995	4,1	0,087352
34	1,445	5,235	13,1	1,55	9,995	4,105	0,087229

⋮

k [-]	C _{ADx} ^k [-]	C _{ADy} ^k [-]	C _{AB} ^k [-]	C _{BC} ^k [-]	C _{CD} ^k [-]	C _{BE} ^k [-]	MIN(C _{pi} ^k)	MAX(C _{pi} ^k)
12	-0,0131	0,039857	-0,0059	-0,05086	0,01405	-0,02137	-0,05086	0,039857
13	-0,05192	0,049962	-0,03607	0,002226	0,050031	-0,03195	-0,05192	0,050031
14	-0,02165	0,040751	-0,01146	-0,03651	0,020985	-0,02403	-0,03651	0,040751
15	-0,01231	0,037003	-0,00311	-0,04679	0,011331	-0,02176	-0,04679	0,037003
16	-0,05136	0,047064	-0,03338	0,006772	0,047449	-0,03242	-0,05136	0,047449
17	-0,02111	0,037999	-0,0089	-0,03219	0,01853	-0,02448	-0,03219	0,037999
18	-0,01192	0,034361	-0,00072	-0,04243	0,009064	-0,02224	-0,04243	0,034361
19	-0,05119	0,044371	-0,03107	0,011591	0,0453	-0,03297	-0,05119	0,0453
20	-0,02097	0,035451	-0,00672	-0,02758	0,01651	-0,02501	-0,02758	0,035451
21	-0,01192	0,031918	0,001295	-0,03776	0,007227	-0,0228	-0,03776	0,031918
22	-0,05138	0,041871	-0,02912	0,01668	0,043561	-0,03359	-0,05138	0,043561
23	-0,0212	0,033093	-0,0049	-0,02268	0,014904	-0,02562	-0,02562	0,033093
24	-0,01229	0,029661	0,002949	-0,0328	0,005798	-0,02343	-0,0328	0,029661
25	-0,05193	0,039551	-0,02751	0,022037	0,04221	-0,03429	-0,05193	0,04221
26	-0,02179	0,030912	-0,00343	-0,01749	0,013689	-0,02631	-0,02631	0,030912
27	-0,01302	0,027576	0,004266	-0,02754	0,004756	-0,02415	-0,02754	0,027576

28	-0,00423	0,024257	0,011962	-0,03769	-0,00418	-0,02197	-0,03769	0,024257
29	-0,04441	0,034189	-0,01883	0,018071	0,032642	-0,03298	-0,04441	0,034189
30	-0,01409	0,025653	0,005262	-0,02199	0,004081	-0,02493	-0,02493	0,025653
31	-0,00544	0,022425	0,012809	-0,03208	-0,00469	-0,02279	-0,03208	0,022425
32	-0,04575	0,032282	-0,01799	0,02402	0,032172	-0,03383	-0,04575	0,032282
33	-0,01549	0,02388	0,005955	-0,01617	0,003753	-0,02579	-0,02579	0,02388
34	-0,00733	0,021757	0,012271	-0,02734	-0,0038	-0,0235	-0,02734	0,021757

⋮

k [-]	AD _x ^{k+1} [m]	AD _y ^{k+1} [m]	AB ^{k+1} [m]	BC ^{k+1} [m]	CD ^{k+1} [m]	BE ^{k+1} [m]	s _{YE} ^{k+1} [m]
12	1,41	5,27	13,1	1,52	9,995	4,1	0,089984
13	1,415	5,27	13,1	1,52	9,995	4,1	0,0898
14	1,415	5,265	13,1	1,52	9,995	4,1	0,089606
15	1,415	5,265	13,1	1,525	9,995	4,1	0,089506
16	1,42	5,265	13,1	1,525	9,995	4,1	0,089325
17	1,42	5,26	13,1	1,525	9,995	4,1	0,089144
18	1,42	5,26	13,1	1,53	9,995	4,1	0,089067
19	1,425	5,26	13,1	1,53	9,995	4,1	0,088886
20	1,425	5,255	13,1	1,53	9,995	4,1	0,088718
21	1,425	5,255	13,1	1,535	9,995	4,1	0,088666
22	1,43	5,255	13,1	1,535	9,995	4,1	0,088484
23	1,43	5,25	13,1	1,535	9,995	4,1	0,088327
24	1,43	5,25	13,1	1,54	9,995	4,1	0,088301
25	1,435	5,25	13,1	1,54	9,995	4,1	0,088116
26	1,435	5,245	13,1	1,54	9,995	4,1	0,08797
27	1,435	5,24	13,1	1,54	9,995	4,1	0,087841
28	1,435	5,24	13,1	1,545	9,995	4,1	0,087792
29	1,44	5,24	13,1	1,545	9,995	4,1	0,087646
30	1,44	5,235	13,1	1,545	9,995	4,1	0,087525
31	1,44	5,235	13,1	1,55	9,995	4,1	0,087506
32	1,445	5,235	13,1	1,55	9,995	4,1	0,087352
33	1,445	5,235	13,1	1,55	9,995	4,105	0,087229
34	1,445	5,235	13,1	1,555	9,995	4,105	0,087234

$$\mu = 0,004 \text{ m}$$

k [-]	AD _x ^k [m]	AD _y ^k [m]	AB ^k [m]	BC ^k [m]	CD ^k [m]	BE ^k [m]	s _{YE} ^k [m]
34	1,445	5,235	13,1	1,55	9,995	4,105	0,087229
35	1,445	5,235	13,1	1,554	9,995	4,105	0,08721
36	1,449	5,235	13,1	1,554	9,995	4,105	0,0871
37	1,449	5,235	13,1	1,554	9,995	4,109	0,087
38	1,449	5,235	13,1	1,554	9,995	4,113	0,086907

39	1,449	5,235	13,1	1,558	9,995	4,113	0,086868
----	-------	-------	------	-------	-------	-------	----------

⋮

k [-]	C _{ADx} ^k [-]	C _{ADy} ^k [-]	C _{AB} ^k [-]	C _{BC} ^k [-]	C _{CD} ^k [-]	C _{BE} ^k [-]	MIN(C _{pi} ^k)	MAX(C _{pi} ^k)
34	-0,00733	0,021757	0,012271	-0,02734	-0,0038	-0,0235	-0,02734	0,021757
35	-0,03968	0,029621	-0,0124	0,017708	0,02574	-0,03237	-0,03968	0,029621
36	-0,01544	0,022938	0,006741	-0,01455	0,003012	-0,02592	-0,02592	0,022938
37	-0,00892	0,021252	0,011781	-0,0235	-0,00302	-0,02409	-0,02409	0,021252
38	-0,00237	0,019557	0,016842	-0,03248	-0,00907	-0,02226	-0,03248	0,019557
39	-0,03487	0,027428	-0,00791	0,012804	0,020577	-0,03116	-0,03487	0,027428

⋮

k [-]	AD _x ^{k+1} [m]	AD _y ^{k+1} [m]	AB ^{k+1} [m]	BC ^{k+1} [m]	CD ^{k+1} [m]	BE ^{k+1} [m]	s _{ye} ^{k+1} [m]
34	1,445	5,235	13,1	1,554	9,995	4,105	0,08721
35	1,449	5,235	13,1	1,554	9,995	4,105	0,0871
36	1,449	5,235	13,1	1,554	9,995	4,109	0,087
37	1,449	5,235	13,1	1,554	9,995	4,113	0,086907
38	1,449	5,235	13,1	1,558	9,995	4,113	0,086868
39	1,453	5,235	13,1	1,558	9,995	4,113	0,086777

4.2.6 Metoda největšího spádu cíl. funkce při změně vektoru jejích parametrů

4.2.6.1 Teoretický úvod, podstata, princip a matematické pozadí metody největšího spádu hodnoty cílové funkce úlohy rozměrové optimalizace mechanismu

Pro: $k = 0, 1, \dots$

$$\mathbf{p}^k = \{p_1^k \ p_2^k \ p_3^k \ \dots \ p_i^k \ \dots \ p_j^k \ \dots \ p_n^k\}^T$$

$$F(\mathbf{p}^k) = F(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)$$

$$\nabla F(\mathbf{p}^k) = \left\{ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k) \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_2}(\mathbf{p}^k) \quad \dots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \quad \dots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \quad \dots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k) \right\}^T$$

$$\nabla F(\mathbf{p}^k) = \{C_{p_1}(\mathbf{p}^k) \ C_{p_2}(\mathbf{p}^k) \ \dots \ C_{p_i}(\mathbf{p}^k) \ \dots \ C_{p_j}(\mathbf{p}^k) \ \dots \ C_{p_n}(\mathbf{p}^k)\}^T$$

$$\text{grad } F(\mathbf{p}) = \nabla F(\mathbf{p}) = \left\{ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1} \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_2} \quad \dots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i} \quad \dots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j} \quad \dots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_n} \right\}^T$$

$$\text{grad } F(\mathbf{p}) = \nabla F(\mathbf{p}) = \{C_{p_1} \quad C_{p_2} \quad \cdots \quad C_{p_i} \quad \cdots \quad C_{p_j} \quad \cdots \quad C_{p_n}\}^T$$

$$\text{grad } F(\mathbf{p}^k) = \nabla F(\mathbf{p}^k) = \left\{ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k) \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_2}(\mathbf{p}^k) \quad \cdots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \quad \cdots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \quad \cdots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k) \right\}^T$$

$$\text{grad } F(\mathbf{p}^k) = \nabla F(\mathbf{p}^k) = \{C_{p_1}(\mathbf{p}^k) \quad C_{p_2}(\mathbf{p}^k) \quad \cdots \quad C_{p_i}(\mathbf{p}^k) \quad \cdots \quad C_{p_j}(\mathbf{p}^k) \quad \cdots \quad C_{p_n}(\mathbf{p}^k)\}^T$$

$$|\text{grad } F(\mathbf{p})|^2 = |\nabla F(\mathbf{p})|^2 = \nabla F(\mathbf{p})^T \cdot \nabla F(\mathbf{p})$$

$$|\nabla F(\mathbf{p})|^2 = \left(\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1} \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1} + \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_2} \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_2} + \cdots + \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i} \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i} + \cdots + \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j} \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j} + \cdots + \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_n} \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_n} \right)$$

$$|\nabla F(\mathbf{p})|^2 = (C_{p_1} \cdot C_{p_1} + C_{p_2} \cdot C_{p_2} + \cdots + C_{p_i} \cdot C_{p_i} + \cdots + C_{p_j} \cdot C_{p_j} + \cdots + C_{p_n} \cdot C_{p_n})$$

$$|\nabla F(\mathbf{p})| = \sqrt{\left(\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_2} \right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i} \right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j} \right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_n} \right)^2}$$

$$|\nabla F(\mathbf{p})| = \sqrt{C_{p_1}^2 + C_{p_2}^2 + \cdots + C_{p_3}^2 + \cdots + C_{p_4}^2 + \cdots + C_{p_5}^2}$$

$$|\text{grad } F(\mathbf{p}^k)|^2 = |\nabla F(\mathbf{p}^k)|^2 = \nabla F(\mathbf{p}^k)^T \cdot \nabla F(\mathbf{p}^k)$$

$$|\nabla F(\mathbf{p}^k)| = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial p_2}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k) \right)^2}$$

$$|\nabla F(\mathbf{p}^k)| = \sqrt{(C_{p_1}(\mathbf{p}^k))^2 + (C_{p_2}(\mathbf{p}^k))^2 + \cdots + (C_{p_i}(\mathbf{p}^k))^2 + \cdots + (C_{p_j}(\mathbf{p}^k))^2 + \cdots + (C_{p_n}(\mathbf{p}^k))^2}$$

$$\mathbf{s}^k = \{s_1^k \quad s_2^k \quad s_3^k \quad \cdots \quad s_i^k \quad \cdots \quad s_j^k \quad \cdots \quad s_n^k\}^T$$

$$\mathbf{s}^k = -\frac{\text{grad } F(\mathbf{p}^k)}{|\text{grad } F(\mathbf{p}^k)|} = -\frac{\nabla F(\mathbf{p}^k)}{|\nabla F(\mathbf{p}^k)|} = -\frac{\nabla F(\mathbf{p}^k)}{\sqrt{\nabla F(\mathbf{p}^k)^T \cdot \nabla F(\mathbf{p}^k)}}$$

$$\mathbf{s}^k = - \frac{\left\{ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k) \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_2}(\mathbf{p}^k) \quad \dots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \quad \dots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \quad \dots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k) \right\}^T}{\sqrt{\sum_{l=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial p_l}(\mathbf{p}^k) \right)^2}}$$

$$\mathbf{s}^k = - \frac{\{C_{p_1}(\mathbf{p}^k) \quad C_{p_2}(\mathbf{p}^k) \quad \dots \quad C_{p_i}(\mathbf{p}^k) \quad \dots \quad C_{p_j}(\mathbf{p}^k) \quad \dots \quad C_{p_n}(\mathbf{p}^k)\}^T}{\sqrt{\sum_{l=1}^n \left(C_{p_l}(\mathbf{p}^k) \right)^2}}$$

$$\mathbf{s}^k = - \frac{\left\{ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k) \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_2}(\mathbf{p}^k) \quad \dots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \quad \dots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \quad \dots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k) \right\}^T}{\sqrt{\sum_{l=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial p_l}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k) \right)^2}}$$

$$\mathbf{s}^k = - \frac{\{C_{p_1}(\mathbf{p}^k) \quad C_{p_2}(\mathbf{p}^k) \quad \dots \quad C_{p_i}(\mathbf{p}^k) \quad \dots \quad C_{p_j}(\mathbf{p}^k) \quad \dots \quad C_{p_n}(\mathbf{p}^k)\}^T}{\sqrt{\sum_{l=1}^n \left(C_{p_l}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k) \right)^2}}$$

$$s_1^k = - \frac{\frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)}{\partial p_1}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial p_2}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k) \right)^2}}$$

$$s_1^k = - \frac{C_{p_1}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\sqrt{\left(C_{p_1}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \left(C_{p_2}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(C_{p_i}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(C_{p_j}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(C_{p_n}(\mathbf{p}^k) \right)^2}}$$

⋮

$$s_2^k = - \frac{\frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)}{\partial p_2}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial p_2}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k) \right)^2}}$$

$$s_2^k = - \frac{C_{p_2}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\sqrt{\left(C_{p_1}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \left(C_{p_2}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_i}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_j}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_n}(\mathbf{p}^k)\right)^2}}$$

⋮

$$s_i^k = - \frac{\frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)}{\partial p_i}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial p_2}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k)\right)^2}}$$

$$s_i^k = - \frac{C_{p_i}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\sqrt{\left(C_{p_1}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \left(C_{p_2}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_i}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_j}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_n}(\mathbf{p}^k)\right)^2}}$$

⋮

$$s_j^k = - \frac{\frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)}{\partial p_j}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial p_2}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k)\right)^2}}$$

$$s_j^k = - \frac{C_{p_j}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\sqrt{\left(C_{p_1}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \left(C_{p_2}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_i}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_j}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_n}(\mathbf{p}^k)\right)^2}}$$

⋮

$$s_n^k = - \frac{\frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)}{\partial p_n}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial p_2}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k)\right)^2}}$$

$$s_n^k = - \frac{C_{p_n}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\sqrt{\left(C_{p_1}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \left(C_{p_2}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_i}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_j}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_n}(\mathbf{p}^k)\right)^2}}$$

$$\mathbf{p}^{k+1} = \{p_1^{k+1} \ p_2^{k+1} \ p_3^{k+1} \ \dots \ p_i^{k+1} \ \dots \ p_j^{k+1} \ \dots \ p_n^{k+1}\}^T$$

$$\mathbf{p}^{k+1} = \mathbf{p}^k + \lambda^k \cdot \mathbf{s}^k$$

$$\mathbf{p}^{k+1} = \mathbf{p}^k - \lambda^k \frac{\left\{ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k) \ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_2}(\mathbf{p}^k) \ \dots \ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \ \dots \ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \ \dots \ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k) \right\}^T}{\sqrt{\sum_{l=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial p_l}(\mathbf{p}^k) \right)^2}}$$

$$\mathbf{p}^{k+1} = \mathbf{p}^k - \lambda^k \cdot \frac{\{C_{p_1}(\mathbf{p}^k) \ C_{p_2}(\mathbf{p}^k) \ \dots \ C_{p_i}(\mathbf{p}^k) \ \dots \ C_{p_j}(\mathbf{p}^k) \ \dots \ C_{p_n}(\mathbf{p}^k)\}^T}{\sqrt{\sum_{l=1}^n \left(C_{p_l}(\mathbf{p}^k) \right)^2}}$$

$$\mathbf{p}^{k+1} = \mathbf{p}^k - \lambda^k \frac{\left\{ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k) \ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_2}(\mathbf{p}^k) \ \dots \ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \ \dots \ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \ \dots \ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k) \right\}^T}{\sqrt{\sum_{l=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial p_l}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k) \right)^2}}$$

$$\mathbf{p}^{k+1} = \mathbf{p}^k - \lambda^k \frac{\left\{ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k) \ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_2}(\mathbf{p}^k) \ \dots \ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \ \dots \ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \ \dots \ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k) \right\}^T}{\sqrt{\sum_{l=1}^n \left(C_{p_l}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k) \right)^2}}$$

$$p_1^{k+1} = p_1^k - \lambda^k \frac{\frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)}{\partial p_1}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial p_2}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k) \right)^2}}$$

$$p_1^{k+1} = p_1^k - \lambda^k \frac{C_{p_1}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\sqrt{\left(C_{p_1}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \left(C_{p_2}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(C_{p_i}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(C_{p_j}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(C_{p_n}(\mathbf{p}^k) \right)^2}}$$

$$p_2^{k+1} = p_2^k - \lambda^k \frac{\frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)}{\partial p_2}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial p_2}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k) \right)^2}}$$

$$p_2^{k+1} = p_2^k - \lambda^k \frac{C_{p_2}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\sqrt{\left(C_{p_1}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \left(C_{p_2}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_i}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_j}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_n}(\mathbf{p}^k)\right)^2}}$$

⋮

$$p_i^{k+1} = p_i^k - \lambda^k \frac{\frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)}{\partial p_i}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k)\right)^2}}$$

$$p_i^{k+1} = p_i^k - \lambda^k \frac{C_{p_i}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\sqrt{\left(C_{p_1}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \left(C_{p_2}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_i}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_j}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_n}(\mathbf{p}^k)\right)^2}}$$

⋮

$$p_j^{k+1} = p_j^k - \lambda^k \frac{\frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)}{\partial p_j}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k)\right)^2}}$$

$$p_j^{k+1} = p_j^k - \lambda^k \frac{C_{p_j}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\sqrt{\left(C_{p_1}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \left(C_{p_2}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_i}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_j}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_n}(\mathbf{p}^k)\right)^2}}$$

⋮

$$p_n^{k+1} = p_n^k - \lambda^k \frac{\frac{\partial F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)}{\partial p_n}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k)\right)^2}}$$

$$p_n^{k+1} = p_n^k - \lambda^k \frac{C_{p_n}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\sqrt{\left(C_{p_1}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \left(C_{p_2}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_i}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_j}(\mathbf{p}^k)\right)^2 + \dots + \left(C_{p_n}(\mathbf{p}^k)\right)^2}}$$

$$F(\mathbf{p}^{k+1}) = F(p_1^{k+1}, p_2^{k+1}, p_3^{k+1}, \dots, p_i^{k+1}, \dots, p_j^{k+1}, \dots, p_n^{k+1})$$

$$F(\mathbf{p}^{k+1}) \cong \frac{1}{0!} \cdot F(\mathbf{p}^k) + \frac{1}{1!} \cdot dF(\mathbf{p}^k) + \frac{1}{2!} \cdot d^2F(\mathbf{p}^k)$$

$$dF(\mathbf{p}^k) = \nabla F(\mathbf{p}^k)^\top \cdot (\mathbf{p}^{k+1} - \mathbf{p}^0) = \nabla F(\mathbf{p}^k)^\top \cdot \lambda^k \cdot \mathbf{s}^k$$

$$dF(\mathbf{p}^k) = \left\{ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k) \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_2}(\mathbf{p}^k) \quad \dots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k) \right\} \cdot \lambda^k \left(- \frac{\left\{ \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k) \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_2}(\mathbf{p}^k) \quad \dots \quad \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k) \right\}^\top}{\sqrt{\sum_{l=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial p_l}(\mathbf{p}^k) \right)^2}} \right)$$

$$dF(\mathbf{p}^k) = \{c_{p_1}(\mathbf{p}^k) \quad c_{p_2}(\mathbf{p}^k) \quad \dots \quad c_{p_n}(\mathbf{p}^k)\} \cdot \lambda^k \left(- \frac{\{c_{p_1}(\mathbf{p}^k) \quad c_{p_2}(\mathbf{p}^k) \quad \dots \quad c_{p_n}(\mathbf{p}^k)\}^\top}{\sqrt{\sum_{l=1}^n (c_{p_l}(\mathbf{p}^k))^2}} \right)$$

$$dF(\mathbf{p}^k) = -\lambda^k \frac{\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k) \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k) + \dots + \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) + \dots + \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) + \dots + \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k) \frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k)}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial p_2}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k) \right)^2}}$$

$$dF(\mathbf{p}^k) = -\lambda^k \frac{c_{p_1}(\mathbf{p}^k)c_{p_1}(\mathbf{p}^k) + \dots + c_{p_i}(\mathbf{p}^k)c_{p_i}(\mathbf{p}^k) + \dots + c_{p_j}(\mathbf{p}^k)c_{p_j}(\mathbf{p}^k) + \dots + c_{p_n}(\mathbf{p}^k)c_{p_n}(\mathbf{p}^k)}{\sqrt{(c_{p_1}(\mathbf{p}^k))^2 + (c_{p_2}(\mathbf{p}^k))^2 + \dots + (c_{p_i}(\mathbf{p}^k))^2 + \dots + (c_{p_j}(\mathbf{p}^k))^2 + \dots + (c_{p_n}(\mathbf{p}^k))^2}}$$

$$dF(\mathbf{p}^k) = -\lambda^k \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial p_2}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k) \right)^2}$$

$$dF(\mathbf{p}^k) = -\lambda^k \cdot \sqrt{(c_{p_1}(\mathbf{p}^k))^2 + (c_{p_2}(\mathbf{p}^k))^2 + \dots + (c_{p_i}(\mathbf{p}^k))^2 + \dots + (c_{p_j}(\mathbf{p}^k))^2 + \dots + (c_{p_n}(\mathbf{p}^k))^2}$$

$$dF(\mathbf{p}^k) = -\lambda^k \cdot |\text{grad } F(\mathbf{p}^k)| = -\lambda^k \cdot |\nabla F(\mathbf{p}^k)|$$

$$d^2F(\mathbf{p}^k) = (\mathbf{p}^{k+1} - \mathbf{p}^k)^\top \cdot \nabla^2 F(\mathbf{p}^k) \cdot (\mathbf{p}^{k+1} - \mathbf{p}^k) = \lambda^k \cdot \mathbf{s}^{k\top} \cdot \nabla^2 F(\mathbf{p}^k) \cdot \lambda^k \cdot \mathbf{s}^k$$

$$\nabla^2 F(\mathbf{p}^k) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_1^2}(\mathbf{p}^k) & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_1 \partial p_2}(\mathbf{p}^k) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_1 \partial p_i}(\mathbf{p}^k) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_1 \partial p_j}(\mathbf{p}^k) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_1 \partial p_n}(\mathbf{p}^k) \\ \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_2 \partial p_1}(\mathbf{p}^k) & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_2^2}(\mathbf{p}^k) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_2 \partial p_i}(\mathbf{p}^k) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_2 \partial p_j}(\mathbf{p}^k) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_2 \partial p_n}(\mathbf{p}^k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_1}(\mathbf{p}^k) & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_2}(\mathbf{p}^k) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i^2}(\mathbf{p}^k) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_j}(\mathbf{p}^k) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_n}(\mathbf{p}^k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_1}(\mathbf{p}^k) & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_2}(\mathbf{p}^k) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_i}(\mathbf{p}^k) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j^2}(\mathbf{p}^k) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_n}(\mathbf{p}^k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_n \partial p_1}(\mathbf{p}^k) & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_n \partial p_2}(\mathbf{p}^k) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_n \partial p_i}(\mathbf{p}^k) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_n \partial p_j}(\mathbf{p}^k) & \dots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_n^2}(\mathbf{p}^k) \end{pmatrix}$$

Přičemž vždy: $n \geq 2$; $i < j$; $i = 1, 2, 3, \dots, j-1$; $j = i+1, i+2, i+3, \dots, n$

$$d^2 F(\mathbf{p}^k) = \frac{(\lambda^k)^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k) \cdot \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \cdot \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_j}(\mathbf{p}^k) \right) \right) \right)}{\left(-\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k) \right)^2} \right) \cdot \left(-\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial p_i}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k) \right)^2} \right)}$$

$$d^2 F(\mathbf{p}^k) = \frac{(\lambda^k)^2 \left(\sum_{i=1}^n \left(C_{p_i}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k) \cdot \sum_{j=1}^n \left(C_{p_j}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k) \cdot \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_j}(\mathbf{p}^k) \right) \right) \right)}{\left(-\sqrt{\sum_{l=1}^n \left(C_{p_l}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_l^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k) \right)^2} \right) \cdot \left(-\sqrt{\sum_{l=1}^n \left(C_{p_l}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_l^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k) \right)^2} \right)}$$

$$d^2 F(\mathbf{p}^k) = \frac{(\lambda^k)^2 \cdot \left(\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \cdot \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_j}(\mathbf{p}^k) \right) \right) \right)}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial p_2}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k) \right)^2}}$$

$$d^2 F(\mathbf{p}^k) = \frac{(\lambda^k)^2 \cdot \left(\sum_{j=1}^n \left(C_{p_j}(\mathbf{p}^k) \cdot \sum_{i=1}^n \left(C_{p_i}(\mathbf{p}^k) \cdot \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_j}(\mathbf{p}^k) \right) \right) \right)}{\sqrt{\left(C_{p_1}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \left(C_{p_2}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(C_{p_i}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(C_{p_j}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(C_{p_n}(\mathbf{p}^k) \right)^2}}$$

$$\text{pro } i = j: \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_j} = \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i^2}; \text{ pro } i \neq j: \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_j} = \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_i}$$

$$\text{pro } i = j: \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_j}(\mathbf{p}^k) = \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i^2}(\mathbf{p}^k); \text{ pro } i \neq j: \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_j}(\mathbf{p}^k) = \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_i}(\mathbf{p}^k)$$

$$d^2F(\mathbf{p}^k) = (\lambda^k)^2 \frac{\sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \right)^2 \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i^2}(\mathbf{p}^k) \right) + 2 \sum_{j=1}^{n-1} \left(\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \sum_{l=j+1}^n \left(\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_l}(\mathbf{p}^k) \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_l}(\mathbf{p}^k) \right) \right)}{|\nabla F(\mathbf{p}^k)|^2}$$

$$d^2F(\mathbf{p}^k) = (\lambda^k)^2 \frac{\sum_{i=1}^n \left(\left(C_{p_i}(\mathbf{p}^k) \right)^2 \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i^2}(\mathbf{p}^k) \right) + 2 \sum_{j=1}^{n-1} \left(C_{p_j}(\mathbf{p}^k) \sum_{l=j+1}^n \left(C_{p_l}(\mathbf{p}^k) \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_l}(\mathbf{p}^k) \right) \right)}{|\nabla F(\mathbf{p}^k)|^2}$$

$$F(\mathbf{p}^{k+1}) \cong \frac{1}{0!} \cdot F(\mathbf{p}^k) + \frac{1}{1!} \cdot \nabla F(\mathbf{p}^k)^T \cdot \mathbf{s}^k \cdot \lambda^k + \frac{1}{2!} \cdot \mathbf{s}^{kT} \cdot \nabla^2 F(\mathbf{p}^k) \cdot \mathbf{s}^k \cdot (\lambda^k)^2$$

$$F(\mathbf{p}^{k+1}) \cong \frac{1}{0!} F(\mathbf{p}^k) - \frac{1}{1} |\nabla F(\mathbf{p}^k)| \lambda^k + \frac{1}{1 \cdot 2} \left(-\frac{\nabla F(\mathbf{p}^k)^T}{|\nabla F(\mathbf{p}^k)|} \right) \nabla^2 F(\mathbf{p}^k) \left(-\frac{\nabla F(\mathbf{p}^k)}{|\nabla F(\mathbf{p}^k)|} \right) (\lambda^k)^2$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{p}^{k+1})}{\partial \lambda^k} = \nabla F(\mathbf{p}^k)^T \cdot \mathbf{s}^k + \frac{1}{1 \cdot 2} \cdot 2 \cdot \lambda^k \cdot \mathbf{s}^{kT} \cdot \nabla^2 F(\mathbf{p}^k) \cdot \mathbf{s}^k = 0$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{p}^{k+1})}{\partial \lambda^k} = -|\nabla F(\mathbf{p}^k)| + \lambda^k \cdot \left(-\frac{\nabla F(\mathbf{p}^k)^T}{|\nabla F(\mathbf{p}^k)|} \right) \cdot \nabla^2 F(\mathbf{p}^k) \cdot \left(-\frac{\nabla F(\mathbf{p}^k)}{|\nabla F(\mathbf{p}^k)|} \right) = 0$$

$$\lambda^k = -\frac{\nabla F(\mathbf{p}^k)^T \cdot \mathbf{s}^k}{\mathbf{s}^{kT} \cdot \nabla^2 F(\mathbf{p}^k) \cdot \mathbf{s}^k} = \frac{|\nabla F(\mathbf{p}^k)|}{\left(-\frac{\nabla F(\mathbf{p}^k)^T}{|\nabla F(\mathbf{p}^k)|} \right) \cdot \nabla^2 F(\mathbf{p}^k) \cdot \left(-\frac{\nabla F(\mathbf{p}^k)}{|\nabla F(\mathbf{p}^k)|} \right)}$$

$$\lambda^k = \frac{|\nabla F(\mathbf{p}^k)|^3}{\sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \right)^2 \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i^2}(\mathbf{p}^k) \right) + 2 \sum_{j=1}^{n-1} \left(\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \sum_{l=j+1}^n \left(\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_l}(\mathbf{p}^k) \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_l}(\mathbf{p}^k) \right) \right)}$$

$$\lambda^k = \frac{|\nabla F(\mathbf{p}^k)|^3}{\sum_{i=1}^n \left(\left(C_{p_i}(\mathbf{p}^k) \right)^2 \cdot \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i^2}(\mathbf{p}^k) \right) + 2 \cdot \sum_{j=1}^{n-1} \left(C_{p_j}(\mathbf{p}^k) \cdot \sum_{l=j+1}^n \left(C_{p_l}(\mathbf{p}^k) \cdot \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_l}(\mathbf{p}^k) \right) \right)}$$

$$\lambda^k = \frac{\left(\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial p_1}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial p_2}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial p_n}(\mathbf{p}^k) \right)^2} \right)^3}{\sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \right)^2 \cdot \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i^2}(\mathbf{p}^k) \right) + 2 \sum_{j=1}^{n-1} \left(\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \sum_{l=j+1}^n \left(\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_l}(\mathbf{p}^k) \cdot \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_l}(\mathbf{p}^k) \right) \right)}$$

$$\lambda^k = \frac{\left(\sqrt{\left(C_{p_1}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \left(C_{p_2}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(C_{p_i}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(C_{p_j}(\mathbf{p}^k) \right)^2 + \dots + \left(C_{p_n}(\mathbf{p}^k) \right)^2} \right)^3}{\sum_{i=1}^n \left(\left(C_{p_i}(\mathbf{p}^k) \right)^2 \cdot \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i^2}(\mathbf{p}^k) \right) + 2 \cdot \sum_{j=1}^{n-1} \left(C_{p_j}(\mathbf{p}^k) \cdot \sum_{l=j+1}^n \left(C_{p_l}(\mathbf{p}^k) \cdot \frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j \partial p_l}(\mathbf{p}^k) \right) \right)}$$

$$\mathbf{p}^{k+1} = \mathbf{p}^k - \frac{\nabla F(\mathbf{p}^k)^T \cdot \mathbf{s}^k}{\mathbf{s}^{kT} \cdot \nabla^2 F(\mathbf{p}^k) \cdot \mathbf{s}^k} \mathbf{s}^k = \mathbf{p}^k - \frac{|\nabla F(\mathbf{p}^k)|}{\left(-\frac{\nabla F(\mathbf{p}^k)^T}{|\nabla F(\mathbf{p}^k)|}\right) \nabla^2 F(\mathbf{p}^k) \left(-\frac{\nabla F(\mathbf{p}^k)}{|\nabla F(\mathbf{p}^k)|}\right) |\nabla F(\mathbf{p}^k)|} \nabla F(\mathbf{p}^k)$$

$$\mathbf{p}^{k+1} = \mathbf{p}^k - \frac{|\nabla F(\mathbf{p}^k)| \cdot \nabla F(\mathbf{p}^k) \cdot |\nabla F(\mathbf{p}^k)|}{\nabla F(\mathbf{p}^k)^T \cdot \nabla^2 F(\mathbf{p}^k) \cdot \nabla F(\mathbf{p}^k)}$$

Přičemž vždy: $n \geq 2$

Proces končí, jakmile $F(\mathbf{p}^{k+1}) > F(\mathbf{p}^k)$, přičemž pak: $\mathbf{p}^* = \mathbf{p}^k$

$$\{p_1^* \ p_2^* \ p_3^* \ \cdots \ p_i^* \ \cdots \ p_j^* \ \cdots \ p_n^*\}^T = \{p_1^k \ p_2^k \ p_3^k \ \cdots \ p_i^k \ \cdots \ p_j^k \ \cdots \ p_n^k\}^T$$

$$p_1^* = p_1^k, p_2^* = p_2^k, p_3^* = p_3^k, \dots, p_i^* = p_i^k, \dots, p_j^* = p_j^k, \dots, p_n^* = p_n^k$$

Chyba optimalizace je pak rovna:

$$F(\mathbf{p}^*) = F(p_1^*, p_2^*, p_3^*, \dots, p_i^*, \dots, p_j^*, \dots, p_n^*) = F(\mathbf{p}^k) = F(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) = \frac{\partial F(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\partial p_i}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \cong \frac{F(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k + \Delta p_i, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k) - F(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\Delta p_i}$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \cong \frac{F(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k + \Delta p_i, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k) - F(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k - \Delta p_i, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{2 \cdot \Delta p_i}$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) = \frac{\partial F(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\partial p_j}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_j}(\mathbf{p}^k) \cong \frac{F(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k + \Delta p_j, \dots, p_n^k) - F(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\Delta p_j}$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{p})}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k) \cong \frac{F(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k + \Delta p_j, \dots, p_n^k) - F(p_1^k, p_2^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k - \Delta p_j, \dots, p_n^k)}{2 \cdot \Delta p_j}$$

$$\frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i^2}(\mathbf{p}^k) = \frac{\partial^2 F(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\partial p_i^2}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)$$

$$\frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i^2}(\mathbf{p}^k) \cong \frac{A - 2F(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k) + B}{\Delta p_i^2}$$

$$A = F(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k - \Delta p_i, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k); B = F(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k + \Delta p_i, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)$$

$$\frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j^2}(\mathbf{p}^k) = \frac{\partial^2 F(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)}{\partial p_j^2}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)$$

$$\frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_j^2}(\mathbf{p}^k) \cong \frac{C - 2F(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k) + D}{\Delta p_j^2}$$

$$C = F(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k - \Delta p_j, \dots, p_n^k); D = F(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k + \Delta p_j, \dots, p_n^k)$$

$$\frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_j}(\mathbf{p}^k) = \frac{\partial^2 F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)}{\partial p_i \partial p_j}(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)$$

$$\frac{\partial^2 F(\mathbf{p})}{\partial p_i \partial p_j}(\mathbf{p}^k) \cong \frac{E - F}{4 \cdot \Delta p_i \cdot \Delta p_j}$$

$$E = F(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k - \Delta p_i, \dots, p_j^k - \Delta p_j, \dots, p_n^k) + F(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k + \Delta p_i, \dots, p_j^k + \Delta p_j, \dots, p_n^k)$$

$$F = F(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k + \Delta p_i, \dots, p_j^k - \Delta p_j, \dots, p_n^k) + F(p_1^k, p_2^k, p_3^k, \dots, p_i^k - \Delta p_i, \dots, p_j^k + \Delta p_j, \dots, p_n^k)$$

Přičemž vždy: $n \geq 2$; $i < j$; $i = 1, 2, 3, \dots, j-1$; $j = i+1, i+2, i+3, \dots, n$

4.2.6.2 Aplikace metody největšího spádu na zvolenou cílovou funkci úlohy rozměrové optimalizace 4-kloubového přímovodu ABCD(EF) přístavního jeřábu

$$\lambda^k = 0,05 \text{ m}$$

k [-]	AD _x ^k [m]	AD _y ^k [m]	AB ^k [m]	BC ^k [m]	CD ^k [m]	BE ^k [m]	s _{YE} ^k [m]
0	1,4	5,3	13,1	1,4	10,1	4,1	0,112578
1	1,399	5,280	13,110	1,444	10,090	4,099	0,101175

:

k [-]	C_{ADx}^k [-]	C_{ADy}^k [-]	C_{AB}^k [-]	C_{BC}^k [-]	C_{CD}^k [-]	C_{BE}^k [-]
0	0,00710714	0,120235074	-0,05864307	-0,26914787	0,05819359	0,00552729
1	-0,108431329	0,126205779	-0,12994516	-0,04778136	0,14808055	-0,03294964

⋮

k [-]	$ \nabla s_{yE}^k $ [-]	s_{syEADx}^k [-]	s_{syEADy}^k [-]	s_{syEAB}^k [-]	s_{syEBC}^k [-]	s_{syECD}^k [-]	s_{syEBE}^k [-]
0	0,306274	-0,0232052	-0,3925739	0,1914727	0,878782	-0,190005	-0,018047
1	0,264325	0,41022009	-0,4774648	0,4916117	0,1807676	-0,560222	0,1246559

⋮

k [-]	AD_x^{k+1} [m]	AD_y^{k+1} [m]	AB^{k+1} [m]	BC^{k+1} [m]	CD^{k+1} [m]	BE^{k+1} [m]	s_{yE}^{k+1} [m]
0	1,399	5,280	13,110	1,444	10,090	4,099	0,101175
1	1,420	5,256	13,135	1,453	10,062	4,105	0,105104

$$\lambda^k = 0,025 \text{ m}$$

k [-]	AD_x^k [m]	AD_y^k [m]	AB^k [m]	BC^k [m]	CD^k [m]	BE^k [m]	s_{yE}^k [m]
1	1,399	5,280	13,110	1,444	10,090	4,099	0,101175
2	1,409	5,268	13,122	1,449	10,076	4,102	0,098629
3	1,400	5,266	13,116	1,471	10,083	4,101	0,097514
4	1,412	5,257	13,128	1,465	10,069	4,105	0,09564
5	1,403	5,256	13,121	1,486	10,077	4,104	0,095104
6	1,416	5,248	13,132	1,478	10,063	4,108	0,093748
7	1,406	5,247	13,124	1,498	10,072	4,107	0,093513
8	1,419	5,240	13,135	1,488	10,059	4,111	0,092417
9	1,409	5,240	13,127	1,507	10,068	4,110	0,09222
10	1,422	5,233	13,138	1,496	10,055	4,115	0,09176
11	1,412	5,234	13,129	1,514	10,065	4,113	0,091227
12	1,425	5,227	13,139	1,503	10,052	4,118	0,091056
13	1,414	5,228	13,130	1,521	10,062	4,117	0,090585
14	1,427	5,222	13,140	1,509	10,050	4,122	0,090381
15	1,416	5,223	13,131	1,527	10,060	4,121	0,090116
16	1,429	5,217	13,141	1,514	10,048	4,126	0,089997
17	1,418	5,218	13,132	1,532	10,058	4,125	0,089547
18	1,431	5,212	13,141	1,519	10,046	4,130	0,08951
19	1,420	5,213	13,132	1,537	10,057	4,129	0,0893
20	1,433	5,208	13,141	1,523	10,045	4,134	0,089127
21	1,422	5,209	13,131	1,540	10,056	4,133	0,088922
22	1,435	5,204	13,140	1,526	10,044	4,138	0,088867
23	1,424	5,205	13,130	1,543	10,055	4,137	0,08856
24	1,437	5,200	13,139	1,529	10,044	4,142	0,088464
25	1,426	5,202	13,129	1,546	10,055	4,141	0,088427
26	1,439	5,197	13,138	1,532	10,044	4,146	0,088049

⋮

k [-]	C_{ADx}^k [-]	C_{ADy}^k [-]	C_{AB}^k [-]	C_{BC}^k [-]	C_{CD}^k [-]	C_{BE}^k [-]
1	-0,108431329	0,126205779	-0,12994516	-0,04778136	0,14808055	-0,03294964
2	0,111758408	0,030041863	0,0725239	-0,27281999	-0,08433762	0,01861359
3	-0,173159531	0,125733918	-0,16663422	0,07934297	0,19559079	-0,05498085
4	0,119278012	0,017204874	0,08707532	-0,25979514	-0,09928376	0,01801349
5	-0,174582062	0,112262717	-0,15655555	0,10996886	0,18666036	-0,05854192
6	0,128327985	0,006922074	0,10049118	-0,25580537	-0,11350231	0,01857876
7	-0,176824223	0,102706484	-0,150065	0,13338658	0,18118384	-0,06136839
8	0,130981206	0,001003227	0,10680081	-0,24876293	-0,11984307	0,01803411
9	-0,170494994	0,093284825	-0,13876942	0,14003936	0,16945821	-0,06129149
10	0,147369549	-0,008217679	0,12352868	-0,26176222	-0,13863459	0,02135149
11	-0,163345479	0,085647945	-0,1284519	0,14145635	0,15845212	-0,06053403
12	0,149985264	-0,011952972	0,12805943	-0,25932445	-0,14333463	0,02132276
13	-0,16530474	0,081295603	-0,12598676	0,15325256	0,1565895	-0,0619891
14	0,147095256	-0,013332052	0,1275793	-0,25107764	-0,14228165	0,02001966
15	-0,167784519	0,078068855	-0,12473564	0,16376083	0,15595194	-0,06336286
16	0,152008692	-0,016798674	0,13318099	-0,25369695	-0,14844841	0,02084366
17	-0,163982101	0,073546676	-0,1188483	0,16507344	0,14971528	-0,06296579
18	0,151224746	-0,018348172	0,13402414	-0,24922391	-0,14905284	0,02021628
19	-0,16969664	0,07218627	-0,12096156	0,17790032	0,15285188	-0,06497083
20	0,150563263	-0,019462272	0,13457101	-0,24583367	-0,14941505	0,01974367
21	-0,167655356	0,069812802	-0,11784952	0,17840736	0,14954024	-0,06469855
22	0,153084495	-0,021170464	0,13737475	-0,24733088	-0,15251944	0,020203
23	-0,165730895	0,067513297	-0,11486281	0,17897145	0,14636835	-0,06444627
24	0,149393831	-0,020959757	0,13512862	-0,2407632	-0,14968632	0,0190504
25	-0,170234402	0,067371802	-0,11730395	0,1873017	0,14955294	-0,06581931
26	0,143728037	-0,020063661	0,13121384	-0,23176393	-0,14491148	0,01740722

⋮

k [-]	$ \nabla s_{yE}^k $ [-]	s_{syEADx}^k [-]	s_{syEADy}^k [-]	s_{syEAB}^k [-]	s_{syEBC}^k [-]	s_{syECD}^k [-]	s_{syEBE}^k [-]
1	0,264325	0,41022009	-0,4774648	0,4916117	0,1807676	-0,560222	0,1246559
2	0,317084	-0,3524569	-0,0947442	-0,228721	0,8604031	0,2659789	-0,058702
3	0,348043	0,49752291	-0,3612594	0,4787743	-0,227969	-0,561973	0,1579713
4	0,315881	-0,3776046	-0,0544664	-0,275659	0,822447	0,3143078	-0,057026
5	0,343444	0,50832744	-0,3268733	0,45584	-0,320194	-0,543496	0,1704555
6	0,324467	-0,395504	-0,0213337	-0,309712	0,7883865	0,3498116	-0,057259
7	0,344559	0,51319068	-0,2980814	0,4355283	-0,387123	-0,525843	0,1781073
8	0,324244	-0,4039589	-0,0030941	-0,329384	0,7672094	0,3696078	-0,055619
9	0,33032	0,51615098	-0,2824074	0,420106	-0,423951	-0,513012	0,1855519
10	0,353892	-0,4164252	0,02322087	-0,349058	0,739667	0,3917427	-0,060333
11	0,315117	0,518365	-0,2717975	0,4076328	-0,448901	-0,502836	0,1921003
12	0,356772	-0,4203952	0,0335031	-0,358939	0,7268631	0,4017541	-0,059766

13	0,318836	0,51846279	-0,254976	0,3951457	-0,480662	-0,491128	0,194423
14	0,348964	-0,4215195	0,03820463	-0,365594	0,7194938	0,4077255	-0,057369
15	0,323974	0,51789578	-0,2409729	0,385018	-0,505476	-0,481372	0,1955804
16	0,357714	-0,4249444	0,04696114	-0,372311	0,7092166	0,4149915	-0,058269
17	0,316311	0,5184202	-0,2325137	0,3757322	-0,52187	-0,473316	0,1990628
18	0,354832	-0,4261864	0,0517094	-0,377711	0,7023707	0,4200654	-0,056974
19	0,32844	0,51667446	-0,2197852	0,368291	-0,541652	-0,465387	0,1978163
20	0,352571	-0,4270438	0,055201	-0,381685	0,6972601	0,4237871	-0,055999
21	0,32442	0,51678566	-0,215193	0,3632627	-0,549928	-0,460947	0,1994286
22	0,357208	-0,428558	0,05926644	-0,384579	0,6923996	0,4269762	-0,056558
23	0,320665	0,51683502	-0,2105415	0,3582019	-0,558126	-0,456453	0,200977
24	0,348932	-0,4281462	0,06006835	-0,387264	0,6900007	0,4289845	-0,054596
25	0,330241	0,51548537	-0,204008	0,3552071	-0,567167	-0,45286	0,1993069
26	0,336592	-0,4270095	0,05960824	-0,38983	0,6885602	0,4305255	-0,051716

:

k [-]	AD_x^{k+1} [m]	AD_y^{k+1} [m]	AB^{k+1} [m]	BC^{k+1} [m]	CD^{k+1} [m]	BE^{k+1} [m]	s_{yE}^{k+1} [m]
1	1,409	5,268	13,122	1,449	10,076	4,102	0,098629
2	1,400	5,266	13,116	1,471	10,083	4,101	0,097514
3	1,412	5,257	13,128	1,465	10,069	4,105	0,09564
4	1,403	5,256	13,121	1,486	10,077	4,104	0,095104
5	1,416	5,248	13,132	1,478	10,063	4,108	0,093748
6	1,406	5,247	13,124	1,498	10,072	4,107	0,093513
7	1,419	5,240	13,135	1,488	10,059	4,111	0,092417
8	1,409	5,240	13,127	1,507	10,068	4,110	0,09222
9	1,422	5,233	13,138	1,496	10,055	4,115	0,09176
10	1,412	5,234	13,129	1,514	10,065	4,113	0,091227
11	1,425	5,227	13,139	1,503	10,052	4,118	0,091056
12	1,414	5,228	13,130	1,521	10,062	4,117	0,090585
13	1,427	5,222	13,140	1,509	10,050	4,122	0,090381
14	1,416	5,223	13,131	1,527	10,060	4,121	0,090116
15	1,429	5,217	13,141	1,514	10,048	4,126	0,089997
16	1,418	5,218	13,132	1,532	10,058	4,125	0,089547
17	1,431	5,212	13,141	1,519	10,046	4,130	0,08951
18	1,420	5,213	13,132	1,537	10,057	4,129	0,0893
19	1,433	5,208	13,141	1,523	10,045	4,134	0,089127
20	1,422	5,209	13,131	1,540	10,056	4,133	0,088922
21	1,435	5,204	13,140	1,526	10,044	4,138	0,088867
22	1,424	5,205	13,130	1,543	10,055	4,137	0,08856
23	1,437	5,200	13,139	1,529	10,044	4,142	0,088464
24	1,426	5,202	13,129	1,546	10,055	4,141	0,088427
25	1,439	5,197	13,138	1,532	10,044	4,146	0,088049
26	1,428	5,198	13,128	1,549	10,055	4,145	0,088240

$$\lambda^k = 0,02 \text{ m}$$

k [-]	AD _x ^k [m]	AD _y ^k [m]	AB ^k [m]	BC ^k [m]	CD ^k [m]	BE ^k [m]	s _{yE} ^k [m]
26	1,439	5,197	13,138	1,532	10,044	4,146	0,088049
27	1,430	5,198	13,130	1,546	10,053	4,145	0,087006

⋮

k [-]	C _{ADx} ^k [-]	C _{ADy} ^k [-]	C _{AB} ^k [-]	C _{BC} ^k [-]	C _{CD} ^k [-]	C _{BE} ^k [-]
26	0,143728037	-0,020063661	0,13121384	-0,23176393	-0,14491148	0,01740722
27	-0,12282052	0,053246116	-0,07881724	0,12649102	0,10411878	-0,05345031

⋮

k [-]	∇s _{yE} ^k [-]	s _{syEADx} ^k [-]	s _{syEADy} ^k [-]	s _{syEAB} ^k [-]	s _{syEBC} ^k [-]	s _{syECD} ^k [-]	s _{syEBE} ^k [-]
26	0,336592	-0,4270095	0,05960824	-0,38983	0,6885602	0,4305255	-0,051716
27	0,232013	0,52937018	-0,2294967	0,3397111	-0,54519	-0,448764	0,2303768

⋮

k [-]	AD _x ^{k+1} [m]	AD _y ^{k+1} [m]	AB ^{k+1} [m]	BC ^{k+1} [m]	CD ^{k+1} [m]	BE ^{k+1} [m]	s _{yE} ^{k+1} [m]
26	1,430	5,198	13,130	1,546	10,053	4,145	0,087006
27	1,441	5,193	13,137	1,535	10,044	4,150	0,087665

$$\lambda^k = 0,0125 \text{ m}$$

k [-]	AD _x ^k [m]	AD _y ^k [m]	AB ^k [m]	BC ^k [m]	CD ^k [m]	BE ^k [m]	s _{yE} ^k [m]
27	1,430	5,198	13,130	1,546	10,053	4,145	0,087006
28	1,437	5,195	13,134	1,539	10,047	4,148	0,086113

⋮

k [-]	C _{ADx} ^k [-]	C _{ADy} ^k [-]	C _{AB} ^k [-]	C _{BC} ^k [-]	C _{CD} ^k [-]	C _{BE} ^k [-]
27	-0,12282052	0,053246116	-0,07881724	0,12649102	0,10411878	-0,05345031
28	0,038906501	0,008656626	0,04893489	-0,08957319	-0,04736206	-0,01055539

⋮

k [-]	∇s _{yE} ^k [-]	s _{syEADx} ^k [-]	s _{syEADy} ^k [-]	s _{syEAB} ^k [-]	s _{syEBC} ^k [-]	s _{syECD} ^k [-]	s _{syEBE} ^k [-]
27	0,232013	0,52937018	-0,2294967	0,3397111	-0,54519	-0,448764	0,2303768
28	0,119838	-0,3246584	-0,0722359	-0,408341	0,7474505	0,3952165	0,0880803

⋮

k [-]	AD _x ^{k+1} [m]	AD _y ^{k+1} [m]	AB ^{k+1} [m]	BC ^{k+1} [m]	CD ^{k+1} [m]	BE ^{k+1} [m]	s _{yE} ^{k+1} [m]
27	1,437	5,195	13,134	1,539	10,047	4,148	0,086113
28	1,433	5,194	13,129	1,548	10,052	4,149	0,086463

$$\lambda^k = 0,01 \text{ m}$$

k [-]	AD _x ^k [m]	AD _y ^k [m]	AB ^k [m]	BC ^k [m]	CD ^k [m]	BE ^k [m]	s _{yE} ^k [m]
28	1,437	5,195	13,134	1,539	10,047	4,148	0,086113
29	1,434	5,194	13,130	1,546	10,051	4,149	0,086066
30	1,440	5,191	13,133	1,541	10,047	4,152	0,085937
31	1,436	5,191	13,129	1,548	10,051	4,153	0,085805
32	1,442	5,188	13,132	1,543	10,047	4,156	0,08573
33	1,438	5,188	13,128	1,550	10,051	4,156	0,085591
34	1,444	5,185	13,131	1,545	10,047	4,159	0,085534
35	1,440	5,185	13,127	1,552	10,051	4,159	0,085381
36	1,446	5,182	13,130	1,547	10,047	4,162	0,085341
37	1,442	5,182	13,126	1,554	10,051	4,162	0,085176
38	1,448	5,179	13,129	1,549	10,047	4,165	0,085153
39	1,444	5,179	13,125	1,556	10,051	4,165	0,084975

:

k [-]	∇s _{yE} ^k [-]	s _{syEADx} ^k [-]	s _{syEADy} ^k [-]	s _{syEAB} ^k [-]	s _{syEBC} ^k [-]	s _{syECD} ^k [-]
28	0,038906501	0,008656626	0,04893489	-0,08957319	-0,04736206	-0,01055539
29	-0,076723178	0,039718081	-0,04164958	0,06669339	0,06020807	-0,04136696
30	0,049881116	0,004766626	0,05827623	-0,10278556	-0,05825681	-0,0077753
31	-0,074231502	0,038185476	-0,03898903	0,06483666	0,05722365	-0,04080814
32	0,052608474	0,003349452	0,06095885	-0,10525843	-0,06130337	-0,00714531
33	-0,073343219	0,037076777	-0,03757767	0,06515644	0,05572914	-0,04069406
34	0,053585732	0,002402331	0,06227986	-0,10535347	-0,06272799	-0,00699735
35	-0,072500762	0,035992708	-0,03621188	0,06550989	0,05428617	-0,04058921
36	0,054513128	0,001479634	0,06355337	-0,10540513	-0,06409839	-0,00686051
37	-0,071703718	0,034932783	-0,03489104	0,06589726	0,05289406	-0,04049358
38	0,055391157	0,000580837	0,06478007	-0,1054133	-0,06541533	-0,00673472
39	-0,070951675	0,033896526	-0,03361452	0,06631878	0,05155216	-0,04040711

:

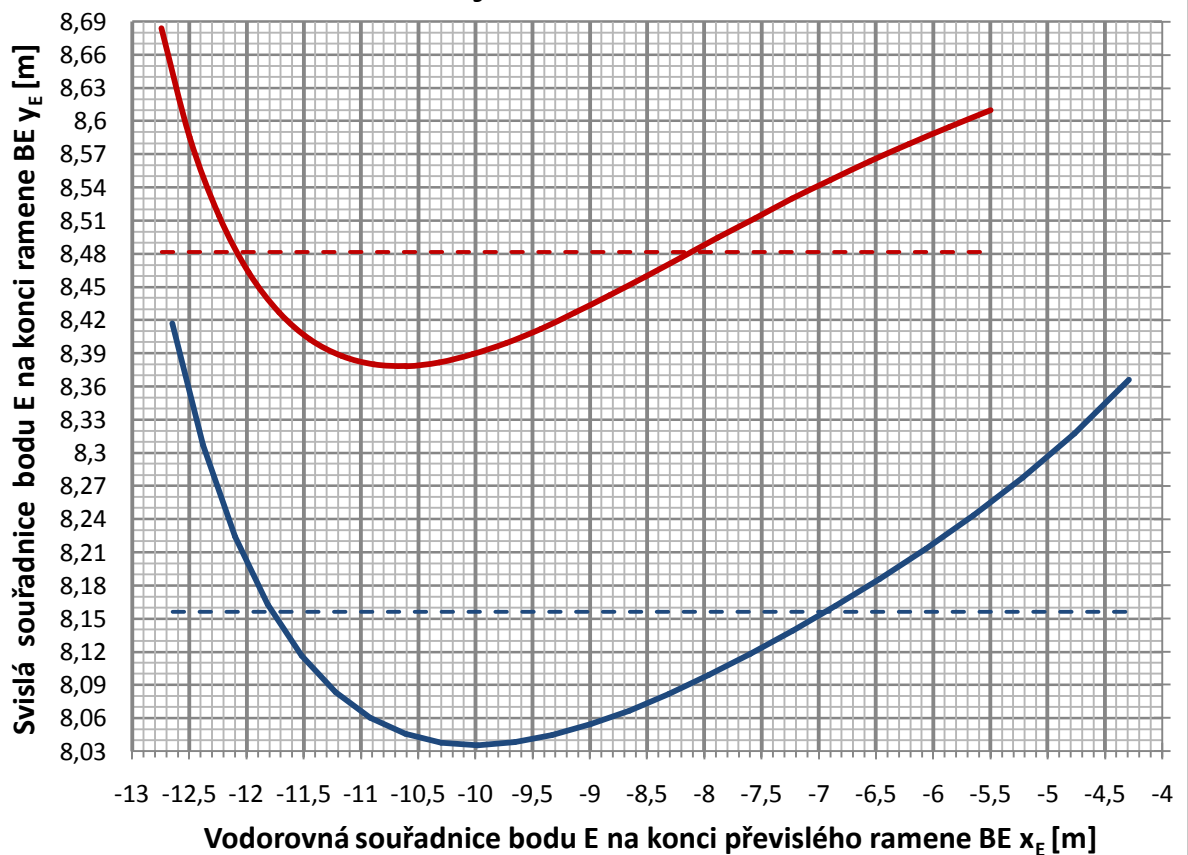
k [-]	∇s _{yE} ^k [-]	s _{syEADx} ^k [-]	s _{syEADy} ^k [-]	s _{syEAB} ^k [-]	s _{syEBC} ^k [-]	s _{syECD} ^k [-]	s _{syEBE} ^k [-]
28	0,119838	-0,3246584	-0,0722359	-0,408341	0,747450	0,395216	0,0880803
29	0,137778	0,5568589	-0,288275	0,302293	-0,484063	-0,436992	0,3002426
30	0,141116	-0,3533658	-0,0337675	-0,412838	0,728149	0,412700	0,0550814
31	0,132786	0,5590293	-0,2875706	0,293622	-0,488278	-0,430945	0,3073216
32	0,14623	-0,3597641	-0,0229053	-0,416868	0,719811	0,419224	0,0488633
33	0,131046	0,5596746	-0,2829291	0,286751	-0,497202	-0,425263	0,3105322
34	0,147781	-0,3626033	-0,0162561	-0,421435	0,712904	0,424467	0,0473496
35	0,129419	0,5602039	-0,278111	0,279804	-0,506186	-0,419462	0,3136276
36	0,149261	-0,3652204	-0,0099131	-0,425787	0,706180	0,429438	0,0459632
37	0,127903	0,5606120	-0,2731203	0,272793	-0,515215	-0,41355	0,3165971

38	0,15067	-0,3676322	-0,003855	-0,429947	0,699630	0,434162	0,0446985
39	0,126497	0,5608943	-0,2679622	0,265732	-0,52427	-0,407535	0,3194304

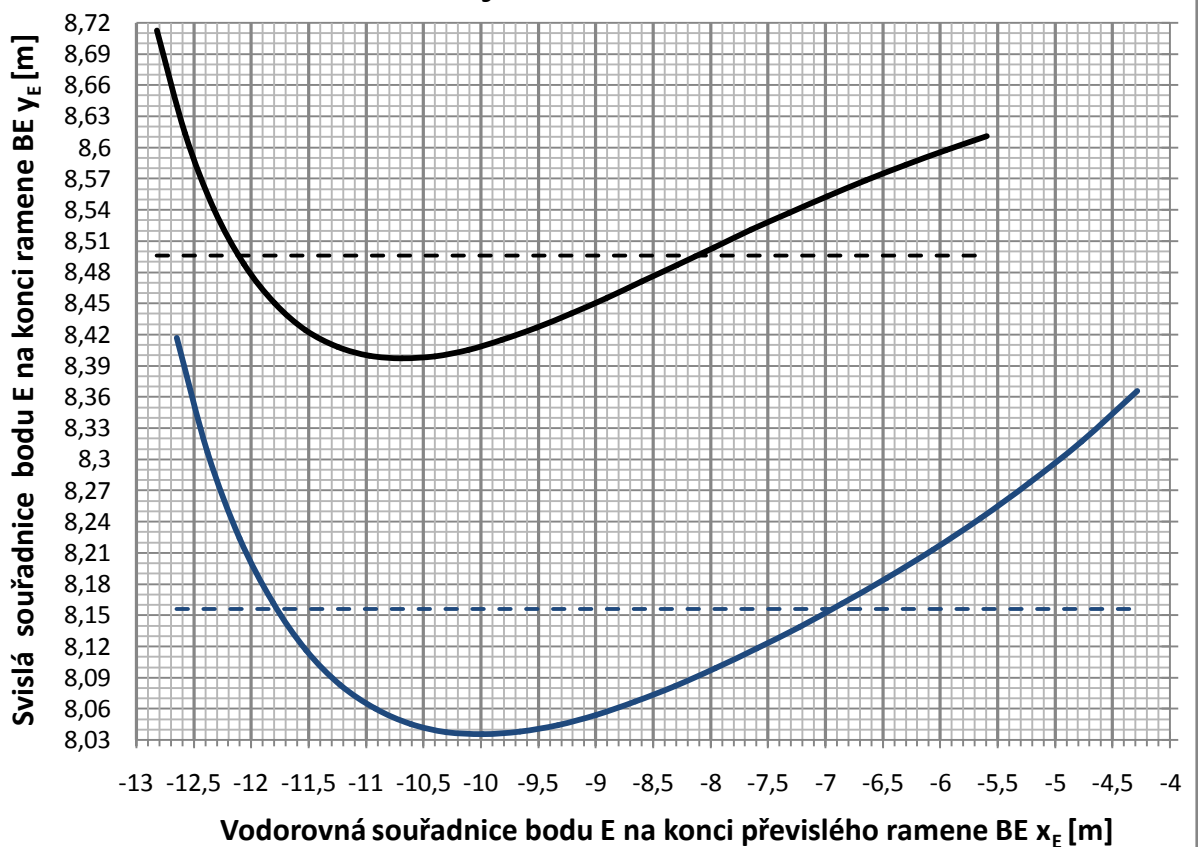
⋮

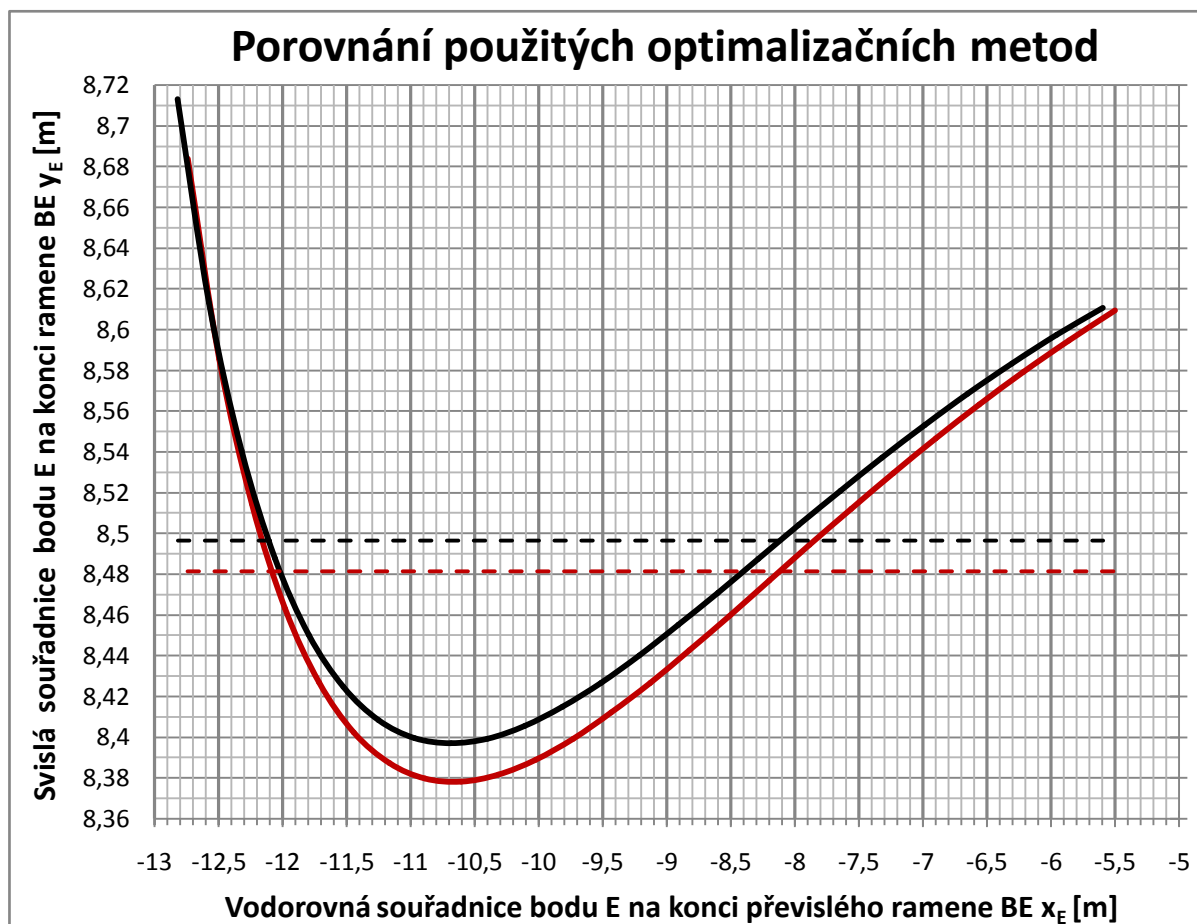
k [–]	AD_x^{k+1} [m]	AD_y^{k+1} [m]	AB^{k+1} [m]	BC^{k+1} [m]	CD^{k+1} [m]	BE^{k+1} [m]	s_{yE}^{k+1} [m]
28	1,434	5,194	13,130	1,546	10,051	4,149	0,086066
29	1,440	5,191	13,133	1,541	10,047	4,152	0,085937
30	1,436	5,191	13,129	1,548	10,051	4,153	0,085805
31	1,442	5,188	13,132	1,543	10,047	4,156	0,08573
32	1,438	5,188	13,128	1,550	10,051	4,156	0,085591
33	1,444	5,185	13,131	1,545	10,047	4,159	0,085534
34	1,440	5,185	13,127	1,552	10,051	4,159	0,085381
35	1,446	5,182	13,130	1,547	10,047	4,162	0,085341
36	1,442	5,182	13,126	1,554	10,051	4,162	0,085176
37	1,448	5,179	13,129	1,549	10,047	4,165	0,085153
38	1,444	5,179	13,125	1,556	10,051	4,165	0,084975
39	1,450	5,176	13,128	1,551	10,047	4,168	0,084968

Porovnání trajektorií bodu E těhlice BCEF



Porovnání trajektorií bodu E těhlice BCEF





5 Závěr

Strukturální analýzou složeného mechanismu rozevírání a vztyčování dílů sloupu jeřábu z vodorovné přepravní polohy s díly sloupu ležícími složenými na kříži či podvozku jeřábu představujícím vůči celému mechanismu nehybný rám do svislé pracovní polohy s díly rozevřenými do přímého úhlu a na něm závislého zvedání výložníku z přepravní polohy, v níž leží složený na horním dílu sloupu, do vodorovné pracovní polohy kolmé na sloup jeřábu při všech 3 fázích vlastního zvedání výložníku (1. – 3. fázi procesu), jenž tvoří submechanismus rozevírání a vztyčování sloupu, plně natažená lana, výložník jeřábu a vzpěry (proti)výložníku jeřábu, a při 0. fázi zdvihu aktivní část mechanismu odpovídá submechanismu zdvihu sloupu bylo potvrzeno, že mechanismus má vždy 1 stupeň volnosti odpovídající nezávislé souřadnici polohy hnací kinematické dvojice mechanismu mezi hydraulickým válcem a v něm posuvně uloženým pístem pístového mechanismu rozevírání a vztyčování sloupu. Při kinematické analýze mechanismu byly zejména získány grafy průběhu funkčních závislostí velikosti úhlů sklonu dílů sloupu a výložníku jeřábu vzhledem k rámu a úhlu rozevření horního dílu sloupu a výložníku na velikosti celkové délky pístového mechanismu, a také byly určeny průběhy stavu natažení trojice lan sloužících pro natáčení vzpěry protivýložníku jeřábu vzhledem k hornímu dílu sloupu způsobujícím přes natažené lano vzpěry protivýložníku zdvih výložníku v závislosti na velikosti úhlu sklonu dolního dílu sloupu vůči rámu a stanovení velikostí úhlů sklonu, pro něž dochází k přechodu mezi jednotlivými fázemi procesu zdvihání výložníku.

Rozměrovou syntézou čtyřkloubového vodícího mechanismu ABCD(EF) zdvihacího zařízení přístavního jeřábu se stavitelným členěným kloubovým výložníkem se převislým ramenem BE těhlice BCEF se bodem E na konci ramene sloužícím ke uchycení břemene optimalizací hodnot všech rozměrových parametrů mechanismu za účelem snížení funkční hodnoty cílové funkce optimalizace hodnot rozměrů mechanismu, jenž byla definována jako směrodatná odchylka hodnot svislé souřadnice E pro ekvidistantní velikosti úhlu natočení hnacího ramene mechanismu od jejich střední hodnoty jako vodorovné přímky, ke které by se trajektorie bodu E měla pak pro co největší rozsah úhlu hnacího ramene přimykát, metodou největší citlivosti funkční hodnoty cílové funkce na velmi malou změnu jednoho ze rozměrů mechanismu a metody největšího spádu funkce při velmi malé změně vektoru parametrů byly získány optimalizované rozměry mechanismu, pro které pak měla trajektorie bodu E menší směrodatnou odchylku od této vodorovné přímky než mechanismus s původními rozměry vstupujícími do optimalizace, ale také byl pro daný rozsah natočení menší interval velikosti vodorovné souřadnice bodu E, který mohl jeřáb obsloužit, přičemž oba jevy byly výraznější pro mechanismus se rozměry získanými po stejném počtu kroků metody největšího spádu.

6 Seznam použitých zdrojů

- [1] BRÁT, Vladimír, Václav JÁČ a Josef ROSENBERG. *Kinematika*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987, 250 s.
- [2] BRÁT, Vladimír. Maticové metody v analýze a syntéze prostorových vázaných mechanických systémů. Praha: Academia, 1981, 210 s.
- [3] PAVLISKA, Jiří, Leopold HRABOVSKÝ. *Dopravní a manipulační zařízení IV*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004, 128 s., ISBN 80-248-0537-5. Skripta. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [4] REMTA, František. *Jeřáby*. I. díl. 2., přeprac. a dopl. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1974, 645 s. Česká matice technická, č. spisu 406, roč. 79 (1974).
- [5] PODEŠVA, Jiří. *Konstrukce jeřábu - kinematický a silový výpočet* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2019-05-20]. Výpočtová zpráva. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, katedra mechaniky.
- [6] HRABOVSKÝ, Leopold. 1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY ZDVIHACÍCH ZAŘÍZENÍ 1. přednáška 2. VŠEOBECNÝ PŘEHLED, ROZDĚLENÍ 3. Právní předpisy. *Doc. Ing. Leopold HRABOVSKÝ, Ph.D: Ústav dopravních a procesních zařízení* [online]. Ostrava [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: http://www.342.vsb.cz/hra42/jer_1.pdf
- [7] HRABOVSKÝ, Leopold. ČSN ISO 4306: Jeřáby, názvosloví. *Doc. Ing. Leopold HRABOVSKÝ, Ph.D: Ústav dopravních a procesních zařízení* [online]. Ostrava [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: http://www.342.vsb.cz/hra42/jer_3.pdf
- [8] Přednáška 11. BRÁZDA, Robert, Jan VYLETĚLEK, Kamil SKÁCEL, Petr GÜNTHER, Jaroslav GRABEC a Jakub ŽALČÍK. *Dopravní a manipulační zařízení* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013, s. 181 [cit. 2019-05-15]. ISBN 978-80-248-3012-4. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_038/Dopravn%C3%AD%20a%20manipula%C4%8Dn%C3%AD%20za%C5%99%C3%ADzen%C3%AD.pdf
- [9] Jeřáb (stroj). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): WikimediaFoundation, 2001-, 10. 2. 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Je%C5%99%C3%A1b_\(stroj\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Je%C5%99%C3%A1b_(stroj))

- [10] Jeřáby. *Střední průmyslová škola stavební České Budějovice* [online]. České Budějovice [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.spsstavcb.cz/download2/633_2763_cs_06_jeraby.pdf
- [11] FORMAN, Zdeněk. Jeřáby. *Strojnictví - Webnode* [online]. Děčín: VOŠ a SPŠ strojní, stavební a dopravní Děčín [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://files.strojarna.webnode.cz/200000041-6b2436c1e4/Je%C5%99%C3%A1by%20-%20pro%20L.pdf>
- [12] PRAŽÁK, František. 14. JEŘÁBY: 14. CRANES. *Index of /documents* [online]. Kolín: Střední průmyslová škola strojírenská a Jazyková škola s právem na Státní jazykové zkoušky, 2018, 10.6.2018 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: http://www.sps-ko.cz/documents/SPS_prazak/14.%20JE%C5%98%C3%81BY.pdf
- [13] BIROŠČÁKOVÁ, Irena. Dopravní stroje a manipulační zařízení. *Střední průmyslová škola, Ostrava - Vítkovice, příspěvková organizace* [online]. Ostrava [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/STR/STR_4_Dopravn%C3%AD%20stroje%20a%20manipula%C4%8Dn%C3%AD%20za%C5%99%C3%ADzen%C3%AD-UT_PL.pdf
- [14] 1 JEŘÁBY Dopravní zařízení, která zdvihají, spouštějí a dopravují ... *Mechatronika | Úvod - WebSnadno.cz: INFORMAČNÍ WEB NEJEN PRO ŽÁKY OBORU STROJÍRENSTVÍ - MECHATRONIKA* [online]. Ostrava [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-str-01.05_jeraby.pdf
- [15] Syllabus přednášky č.10 z ING3: Aplikace IG v průmyslu. *Katedra speciální geodézie: Fakulta stavební* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: http://k154.fsv.cvut.cz/vyuka/geodezie/ing3/Syllabus_ING3_10.pdf
- [16] PLŠEK, Petr. Dopravní stroje a zařízení: Jeřáby. *DUMy* [online]. Brno: Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola technická Brno, Sokolská 1, 5. prosince 2013 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: http://domes.spsbrno.cz/web/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY_32_INOVACE_07-01.pdf
- [17] Jeřáby. *ELUC* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1921>
- [18] VARGA, Tomáš. Jeřáby a zdvižná technika. *I-TES: Internetový Technicko-Ekonomický Server: Portál pro uživatele dopravy a přepravy materiálu, strojů a zařízení, minerálů a*

surovin, těžebního, stavebního průmyslu a důlní činnosti [online]. 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.i-tes.com/dopravni-stavebni-a-manipulacni-technika/jeřaby-a-zdvizna-technika-94/>

[19] 17. Zdvihadla a jeřáby. *Strojírenství: Vše co student potřebuje vědět* [online]. Listopad 2010 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://strojirenstvi.studentske.cz/2010/11/17-zdvihadla-jeřaby.html>

[20] 2.7.1 ZVEDACÍ A SKLÁPĚCÍ ÚSTROJÍ. *Studijní materiály nejen do strojírenství* [online]. 2019, duben 2011 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://strojirenstvi-stredni-skola.blogspot.com/2011/04/271-zvedaci-sklapeci-ustroji.html>

[21] PLŠEK, Petr. Dopravní stroje a zařízení: Pojížděcí a zdvihací zařízení. *DUMy* [online]. Brno: Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola technická Brno, Sokolská 1, 5. prosince 2013 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY_32_INOVACE_07-03.pdf

[22] Mostový jeřáb. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): WikimediaFoundation, 2001-, 28. 2. 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Mostov%C3%BD_je%C5%99%C3%A1b

[23] Portálový jeřáb. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): WikimediaFoundation, 2001-, 4. 7. 2013 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Port%C3%A1lov%C3%BD_je%C5%99%C3%A1b

[24] Autojeřáb. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): WikimediaFoundation, 2001-, 3. 2. 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Autoje%C5%99%C3%A1b>

[25] Věžový jeřáb. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 12. 1. 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/V%C4%9B%C5%BEov%C3%BD_je%C5%99%C3%A1b

[25] Kolejový jeřáb. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): WikimediaFoundation, 2001-, 2. 11. 2018 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kolejov%C3%BD_je%C5%99%C3%A1b

[26] ROZDĚLENÍ JEŘÁBŮ. *SlidePlayer - Upload and Share your PowerPoint presentations* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/11224361/>

- [27] ROUSEK, Miroslav. Portálové, mostové a sloupové jeřáby. : *Portál pro uživatele dopravy a přepravy materiálu, strojů a zařízení, minerálů a surovin, těžebního, stavebního průmyslu a důlní činnosti* [online]. 2019, 2.9.2009 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.techportal.cz/33/portalove-mostove-a-sloupove-jeraby-uniqueidgOkE4NvrWuOKaQDKuox_Z3vlj4nyKYEpr7xXh8a407c/?query=je%F8%E1bov%E1%20dr%E1ha&serp=1
- [28] Kladkostroj jeřábu pro práci na stavbách. In: *Institut Fyziky: VŠB-TU Ostrava* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: http://if.vsb.cz/bf/24.html#aplikace_2
- [29] Scheppach HRS 400 lanový naviják elektrický. In: *KUTIL.cz: Vše pro dům, dílnu a zahradu: VŠB-TU Ostrava* [online]. Pardubice: Železářství KUTIL, 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.kutil.cz/zahrada-stavba-dilna/dilenske-vybaveni/manipulacni-technika/kladky-zvedaky-navijaky/scheppach-hrs-400-lanovy-navijak-elektricky/?a_box=c968vmva
- [30] Jeřábový hák. In: *Clipart.me: Free Clipart Files, Illustrations and Vector Graphics* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://cz.clipart.me/istock/crane-hook-383178>
- [31] Mostový jeřáb s drapákem výrobci: Dvojitý nosník mostový jeřáb s drapákem, QZ režie jeřáb výrobci. In: *Henan Dowell Crane Co., Ltd.: Čína Portálové jeřáby, věžové jeřáby, jeřábové jeřáby, mostové jeřáby ...* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://cz.cranefly.com/overhead-crane/overhead-crane-with-grab-manufacturers.html>
- [32] Pojezdová kočka REMA 212. In: *Ing. Vladimír Gajdečka: Průmyslová technika: Výroba, prodej, montáž a servis průmyslové techniky* [online]. Paskov, Ostrava - Stará Bělá [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.gajdecka.cz/produkty/p.php/kladkostroje/pojezdova%20kocka/>
- [33] Liebherr LTM 11200 9.1 - Gigantický autojeřáb. In: *Automobil Revue: Nejrozsáhlejší motoristický portál* [online]. Praha, 2019, 2010 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.automobilrevue.cz/rubriky/truck-bus/predstavujeme/liebherr-ltm-11200-9-1-giganticky-autojerab_39245.html

[34] Mobilní jeřáby. In: *Demolice.cz* | *Pavel Švestka s.r.o.: Demolice, zemní práce* [online]. Nučice u Rudne, Černošice, 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.demolice.cz/cinnosti-spolecnosti/mobilni-jeraby/>

[35] JVS pro vás dodává věžové jeřáby již 18 let. In: *Tvstav.cz: Stavební a inventorské noviny* [online]. Zlín, 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://tvstav.cz/clanek/566-jvs-pro-vas-dodava-vezove-jeraby-jiz-18-let>

[36] Na Mělnicku vykolejil vlak s uhlím, škoda je 110 milionů korun. In: *E15.cz - Byznys, politika, ekonomika, finance, události* [online]. Praha, 2019, 2012 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.e15.cz/galerie/nazory/109229/na-melnicku-vykolejil-vlak-s-uhlim-skoda-je-110-milionu-korun?foto=4>

[37] FOTOTAPETA VINYLOVÁ PLOVOUCÍ JEŘÁB. In: *Pixers® • Žijeme pro změnu* [online]. 2019, 2012 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://pixers.cz/fototapety/plovouci-jerab-10052826>